

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Vliv geomagnetických poruch na provoz sítí
Geomagnetic Disturbances and Impacts upon
Power System Operation

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jonáš Musial**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Vliv geomagnetických poruch na provoz sítí**
Geomagnetic Disturbances and Impacts upon Power System Operation

Zásady pro vypracování:

1. Modelování geomagnetických poruch metodou konečných prvků.
2. Analýza vlivu poruch na přenosové soustavy modelem v EMTP-ATP.
3. Možnosti modelování pro řešenou problematiku.

Seznam doporučené odborné literatury:


Dokumentace programu EMTP-ATP.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Věceslav Mach**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015



prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry

prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení Studenta

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

Dne: 7. 5. 2015



.....

Jonáš Musial

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na modelování vlivu geomagnetických bouří na elektrické sítě. Nejprve popisuje vznik těchto bouří a způsob, jakým ovlivňují zemský povrch. Poté se zabývá jejich důsledky na elektrické sítě. Další kapitoly se věnují již samotnému modelování. Je vytvořen model části povrchu Země v programu ANSYS Maxwell, na kterém je ukázán výpočet geoelektrického pole a výpočet napětí mezi dvěma uzly elektrické sítě. V programu EMTP-ATP je simulován vliv geomagneticky indukovaných proudů na transformátory a následně je vytvořen i model části elektrické sítě, na kterém je názorně ukázáno chování sítě na základě výpočtů z Maxwellu. Poslední část se zabývá možnostmi modelování této problematiky a uvádí i několik programů, vhodných pro tyto výpočty.

Klíčová slova

Modelování, ANSYS Maxwell, EMTP-ATP, geomagnetická bouře, geoelektrické pole, GIC, nasycení transformátoru

Abstract

The master's thesis focuses on the modeling of the effects of geomagnetic storms on the power grid. First, it describes the creation of these storms and how they affect the Earth's surface. Then it discusses their impacts on the power grid. Next chapters are focused on the modeling itself. In ANSYS Maxwell is created model of the Earth's surface, which shows how geoelectric field and voltage between two nodes of the grid can be calculated. Software EMTP-ATP is used for simulations of geomagnetically induced currents impacts on the transformers and then model of the simple power grid is created, which shows network behavior based on the voltage calculations from Maxwell. The last part deals with the existing modeling capabilities of this issue and presents several programs suitable for these calculations.

Key words

Modeling, ANSYS Maxwell, EMTP-ATP, geomagnetic storm, geoelectric field, GIC, saturated transformer

Seznam použitých symbolů

A	(Wb·m ⁻¹)	Vektorový potenciál
B	(T)	Magnetická indukce
d_i	(km)	Tloušťka i-té vrstvy
D_{st}	(nT)	Disturbance storm time index
E	(V·m ⁻¹)	Intenzita elektrického pole
E_{\parallel}	(V·m ⁻¹)	Tečná složka intenzity elektrického pole
f	(Hz)	Frekvence
i	(A)	Okamžitá hodnota proudu
$i_{0\%}$	(%)	Procentní proud naprázdno
i_m	(A)	Okamžitá hodnota magnetizačního proudu
i_p	(A)	Okamžitá hodnota proudu primárního vinutí
I	(A)	Efektivní hodnota proudu
I_0	(A)	Proud naprázdno
I_1	(A)	Efektivní hodnota první harmonické proudu
I_k	(A)	Proud nakrátko
I_n	(A)	Efektivní hodnota n-té harmonické proudu
J	(A·m ⁻²)	Proudová hustota
K	(-)	K index
K_p	(-)	Vážený průměr K indexu
l	(km)	Délka vedení
n	(-)	Řád harmonické vyšších řádů
P	(MW)	Činný výkon
ΔP_0	(kW)	Ztráty naprázdno
ΔP_k	(kW)	Ztráty nakrátko
Q	(Mvar)	Jalový výkon
S	(MV·A)	Zdánlivý výkon
t	(s)	Čas
u	(kV)	Okamžitá hodnota napětí
$u_{0\%}$	(%)	Procentní napětí naprázdno
U	(V)	Efektivní hodnota napětí
U_0	(kV)	Napětí naprázdno
U_1	(V)	Efektivní hodnota první harmonické napětí
U_n	(V)	Efektivní hodnota n-té harmonické napětí
U_k	(V)	Napětí nakrátko
v	(m s ⁻¹)	Rychlost proudění plazmatu
v_p	(m s ⁻¹)	Rychlost neutrálního plynu
z_k	(%)	Procentní impedance nakrátko
ΔP	(MW)	Rozdíl činného výkonu
ΔQ	(Mvar)	Rozdíl jalového výkonu
σ	(S·m ⁻¹)	Vodivost
σ_i	(S·m ⁻¹)	Vodivost i-té vrstvy
φ	(V)	Skalární potenciál

Seznam zkratek

CME	Coronal Mass Ejection (Výron koronární hmoty)
EPRI	Electric Power Research Institute
EMTP-ATP	ElectroMagnetic Transients Program – Alternate Transients Program
FFT	Rychlá Fourierova transformace
GIC	Geomagnetically Induced Currents (Geomagneticky indukované proudy)
GPS	Globální polohovací systém
IFFT	Inverzní rychlá Fourierova transformace
ISS	Mezinárodní kosmická stanice
MTP	Měřicí transformátor proudu
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (Národní úřad pro oceán a atmosféru)
SVC	Statických var kompenzátor
USA	Spojené státy americké
vvn	Velmi vysoké napětí
zvn	Zvlášť vysoké napětí

Obsah

ÚVOD	1
1. HISTORICKÉ UDÁLOSTI	2
2. GEOMAGNETICKÉ PORUCHY	3
2.1 Kosmické počasí	3
2.2 Geomagnetické bouře.....	4
2.2.1 Magnetosféra.....	5
2.2.2 Ionosféra.....	8
2.2.3 Povrch	11
2.2.4 Vyhodnocování bouří.....	11
3. VLIV GEOMAGNETICKÝCH PORUCH NA PŘENOSOVOU SOUSTAVU.....	13
3.1 Transformátory.....	15
3.2 Generátory.....	19
3.3 Řídicí a ochranné zařízení	20
3.4 Ostatní prvky	21
3.5 Síť jako celek	21
4. MODELOVÁNÍ GEOMAGNETICKÝCH PORUCH	22
4.1 Základní model.....	22
4.2 Přesnější model	26
4.2.1 Výpočet napětí.....	30
4.3 Nehomogenity podloží	33
5. MODELOVÁNÍ V EMTP-ATP	35
5.1 Transformátory.....	35
5.2 Vedení	42
5.3 Část sítě	43
6. MOŽNOSTI MODELOVÁNÍ	47
6.1 Geofyzikální přístup.....	48
6.2 Technický přístup.....	49
7. ZÁVĚR	51
8. LITERATURA.....	52
9. SEZNAM PŘÍLOH.....	56

ÚVOD

S rostoucím vývojem lidstva, se lidé stále více a více spoléhají na moderní technologie. Počítače, satelity, rádia a televize, semaforey, ledničky, zdravotnické přístroje, elektrické vlaky a brzy už ve větším měřítku i elektrická auta. Nejen tyto, ale i spousta dalších věcí, které používáme vědomě či nevědomě v každodenním životě, potřebují ke svému provozu elektrickou energii. Na elektrické energii jsme tak v současnosti de facto závislí a každý vzniklý problém v této oblasti může mít dalekosáhlé negativní společenské a ekonomické důsledky. Avšak čím větší naše znalosti jsou a čím více elektřinu využíváme, tím se stává elektrotechnika složitější a zranitelnější.

Jedním z problémů, kterým musíme čelit, jsou geomagnetické bouře. Při erupci na povrchu Slunce, se ze Slunce vychrlí nabitě částice. Střetnutí těchto částic s planetou Zemí, zapříčiní změny v magnetickém poli Země, které mohou dále ovlivnit provoz elektrických zařízení. Může dojít k poničení až selhání satelitů, zvýšení radiace ve velkých výškách, rušení rádiových vln nebo ke změně geoelektrického pole Země. Právě tato změna má za následek vznik geomagneticky indukovaných proudů, které mohou přetížit elektrizační soustavu. V nejhorším případě dojde až ke zničení transformátorů, což může v některých oblastech vést ke dlouhodobému výpadku elektrické energie.

U příležitosti otevření nového centra pro předpověď tzv. kosmického počasí ve Velké Británii vyšel na BBC na toto téma článek [1], ve kterém je uvedeno, že pojišťovací společnost Lloyd's of London vypracovala v roce 2012 studii, ve které zkoumala, jak by se elektrizační síť Spojených států vypořádala s dosud největší zaznamenanou geomagnetickou bouří, která zasáhla naši planetu v roce 1859, kdy byla po velké části Země viditelná polární záře a z telegrafů sršely jiskry. Zjistilo se, že by došlo k přerušení dodávek elektřiny až na 16 dní a v některých oblastech dokonce až na 2 roky. Finanční škody při takovéto události by dosáhly 0,6 až 2,6 bilionů dolarů.

Že se jedná o reálnou hrozbu, dokládá kupříkladu i to, že Velká Británie uzavřela dohodu se Spojenými státy a v současné době spolupracují na předpovědích tzv. kosmického počasí. Údaje z těchto předpovědí mají k dispozici například dispečerů přenosových soustav, kteří se mohou na geomagnetické bouře lépe připravit a minimalizovat tak jejich vliv. V roce 2011 byla ve Velké Británii problematika geomagnetických bouří dokonce zařazena do Národního registru rizik. K problematice geomagnetických bouří se tam tedy přistupuje stejně důkladně jako například k rizikům způsobených sopečnou erupcí na Islandu, pandemií chřipky nebo teroristickými útoky.

1. HISTORICKÉ UDÁLOSTI

Geomagnetické bouře nejsou ničím novým, ale závažným problémem se pro nás staly až po rozvoji elektrotechniky. První známé pozorování negativního vlivu těchto bouří na elektrické přístroje bylo v roce 1847, kdy se zjistilo, že v té době stále více se rozšiřujícím telegrafním vedením tečou nežádoucí proudy. Následně byla nalezena spojitost mezi těmito proudy, polární září a cyklem slunečních skvrn. Od té doby bylo zaznamenáno mnoho takových bouří s různou intenzitou a způsobenými škodami. V následujících odstavcích je uvedeno několik z nich [2]:

- Přelom srpna a září 1859 – dosud největší zaznamenaná bouře, také známa jako Carringtonova událost, podle jejího pozorovatele Richarda Carringtona. V Severní Americe i v Evropě byly zaznamenány poruchy telegrafních vedení. Obsluhy telegrafních stanic odpojovaly přístroje, aby je uchránily před protékající proudy a například v Norsku způsobovaly jiskry z telegrafních vedení i požáry. Zároveň s tímto byly hlášeny pozorování polární záře z Ameriky i Evropy. [2]
- 14. - 15. května 1921 – Polární záře byla k vidění v Severní Americe, Evropě a také v Austrálii. V těchto oblastech se vyskytovaly výpadky telegrafního spojení a ve Švédsku způsobila bouře požár několika telegrafních stanic. [3], [4]
- 24. března 1940 – I tentokrát způsobila bouře svým vlivem na telegrafní vedení požáry. Zároveň byl poprvé zaznamenán i vliv na elektrizační soustavu ve Spojených státech. Docházelo k náhlým poklesům napětí, kolísání jalového výkonu a odpojování transformátorů. [4]
- 4. srpna 1972 – Bouře způsobila výpadek několika telekomunikačních linek v USA. Opět bylo zaznamenáno kolísání napětí v síti a na některých místech na severu Spojených států byly mezi transformátory a zemí naměřené kvazi-stejnosměrné proudy až o velikosti 100 A. [4]
- 13. března 1989 – V tento den zasáhla Zemi jedna z nejsilnějších geomagnetických bouří 20. Století. Výsledkem bylo přesycení transformátorů, přetížení dalších zařízení a výpadek některých vedení. Nejvíce byla postižena elektrizační síť společnosti Hydro-Québec v Kanadě. Kvůli přesycení transformátorů a vzniklých harmonických vyšších řádů došlo k odpojení několika vedení, což mělo za následek další přepětí a kolísání výkonu, což nakonec vyústilo k celkovému rozpadu sítě. Celá oblast se 6 miliony obyvateli byla na 9 hodin bez proudu. Došlo k poškození dvou blokových transformátorů a dalšího vybavení. V jaderné elektrárně Salem v New Jersey byl při této bouři jeden blokový transformátor zničen. [4], [5]
- Období mezi 19. říjnem a 5. listopadem 2003 – V tuto dobu zasáhlo Zemi několik bouří, které jsou často nazývány jako Halloweenské bouře. Bylo zaznamenáno mnoho problémů, které tyto bouře způsobily. Ovlivnily vesmírné mise, leteckou dopravu, v Severní Americe byli v elektrizační soustavě na několika místech naměřeny velké proudy středními vodiči a docházelo k přehřívání transformátorů. Významný vliv měla bouře dne 30. října na švédskou elektrizační soustavu. Harmonické generované přesycenými transformátory, zapříčinily špatnou funkčnost ochrany a ty tak vypnuly některá vedení. Došlo k hodinovému výpadku elektrické energie, který postihl asi 50 tisíc obyvatel. [3], [6]

2. GEOMAGNETICKÉ PORUCHY

2.1 Kosmické počasí

Pod pojmem kosmické počasí je zahrnuta oblast výzkumu, který se zabývá vlivy Slunce a dalších vesmírných zdrojů na meziplanetární prostor, Zemskou magnetosféru, ionosféru a termosféru, na vesmírné a pozemní technologické systémy a jejich následným dopadem na lidský život a zdraví. Snaha porozumět těmto fyzikálním pochodům mezi Sluncem a Zemí sahá hluboko do minulosti, ale až s technickým rozvojem umožňujícím vznik vesmírných misí, bylo možné tyto jevy důkladně prozkoumat. Nejde však jen o lidskou zvědavost, ale s technickým rozvojem se stává technika na kosmickém počasí závislá a sílí tak potřeba tyto jevy znát, umět je předpovídat a snížit tak případné vzniklé škody. [7]

Slunce je největším zdrojem energie v naší sluneční soustavě, udržuje život na naší planetě a jedná se také o hlavní zdroj kosmického počasí. Vyzařuje energii především ve formě elektromagnetického záření. Okem viditelná koule, fotosféra, je obklopena několika vrstvami atmosféry – chromosférou a korónou – tvořenými plně ionizovaným plazmatem, které do vyzařovaného spektra přispívají zářeními s extrémně ultrafialovými a rentgenovými vlnovými délkami. Kromě elektromagnetického záření proudí ze Slunce neustále i tok nabitých částic (plazmatu), který se označuje jako sluneční vítr. Ten se šíří rychlostí v řádu stovek kilometrů za sekundu a vyplňuje mezihvězdný prostor ještě daleko za nejvzdálenějšími planetami naší sluneční soustavy. [7]

Jelikož se magnetická struktura sluneční fotosféry neustále mění, vznikají náhlá krátkodobá navýšení rentgenových, gama, rádiových či ultrafialových záření. Z tohoto pohledu je chování Slunce ovlivněno svým 22letým slunečním cyklem, při němž každých 11 let prohodí své magnetické póly. Během tohoto cyklu se mění i sluneční aktivita, tedy četnost výskytu slunečních skvrn, erupcí apod. Většina slunečních bouří vzniká během tzv. slunečního maxima, což je 4 až 6 let trvající období největší sluneční aktivity. Tou dobou bývá zaznamenáno nejvíce bouří, je však trochu paradoxní, že ačkoliv je pravděpodobnost vzniku bouře v tomto období nejvyšší, ty největší historicky na Zemi zaznamenané bouře v tomto období nevznikly. To jen dokládá, jak je Slunce nevyzpytatelné a jak důležitá je jeho znalost, abychom byli schopni tyto události předpovídat, čehož, i přes velký pokrok v posledních desetiletích, stále nejsme spolehlivě a s dostatečným předstihem schopni. [3] [7]

Jevy způsobené Sluneční aktivitou a jejich dopady na Zemi se mohou rozdělit na tyto oblasti [3]:

Sluneční erupce

Jedná se o intenzivní krátkodobé uvolnění energie převážně z aktivních slunečních zón. Ve viditelném spektru to jsou velmi jasně zářící oblasti na slunečním povrchu. Doba trvání erupce se pohybuje v rozmezí několika minut až hodin. Sluneční erupce jsou největší exploze v naší sluneční soustavě, které se rovnají přibližně 10 milionům sopečných erupcí na Zemi. Vyzařují energii napříč elektromagnetickým spektrem od gama záření přes viditelné světlo až po kilometr dlouhé rádiové vlny. Tato záření nemají na elektrizační soustavu velký vliv, ale letí k nám rychlostí světla kolem

osmi minut a jedná se tak o první známky proběhnuté erupce na Slunci, které jsme schopni zaznamenat, vyhodnotit a připravit se na případné další následky. Během 11letého slunečního cyklu vznikne asi 175 velmi silných a až 10 extrémních slunečních erupcí.

Radiační bouře

Jejich výskyt je většinou spojen s velkými slunečními erupcemi. Při těchto událostech jsou ze slunce uvolněny nabitě sluneční částice (převážně protony). Některé z těchto částic jsou zachyceny magnetickým polem Země a ty tak proniknou do vyšší vrstvy zemské atmosféry. Jakmile se tak stane, tyto částice způsobí zvýšení radiace, což představuje hrozbu hlavně pro komunikaci, satelity a ostatní vesmírné mise, ale už ne tak pro elektrizační soustavu na Zemi. Radiační bouře doputuje k Zemi přibližně během 30 minut a během jednoho slunečního cyklu vznikne asi 10 silných a 5 velmi silných bouří.

Geomagnetické bouře

Také vznik těchto bouří je spojen s velkými slunečními erupcemi. Geomagnetické bouře jsou nejčastěji způsobeny výronem koronární hmoty (CME – z anglického Coronal Mass Ejection) ze Slunce. Jedná se vlastně o plazmu tvořenou nabitými částicemi skládající se z elektronů, protonů a iontů slunečního větru. Toto mračno vysoce energetických částic se silným magnetickým polem se pohybuje rychlostí dosahující až dvou tisíc kilometrů za sekundu a Zemi zasáhne za jeden až dva dny od erupce na Slunci. Průměrně se vyskytne 200 silných a velmi silných geomagnetických bouří během 11letého slunečního cyklu a asi 4 extrémní.

2.2 Geomagnetické bouře



Obr. 2.1 Jevy mezi Sluncem a Zemí [8]

Na obr. 2.1 je znázorněna posloupnost jevů mezi Sluncem a Zemí. Jak již bylo naznačeno v předchozím textu, přesný původ erupcí nám ještě není zcela znám. Kvůli nedostatečným možnostem vzdáleného monitorování není ani zcela znám způsob šíření vyvrženého mračna nabitých částic meziplanetárním prostorem, avšak pokud se CME srazí se Zemí, způsobí tyto vyvržené částice změny proudů v zemské atmosféře, což dále zapříčiní změnu geoelektrického pole Země a tok geomagneticky indukovaných proudů (GIC – z anglického Geomagnetically Induced Currents). V následujících kapitolách budou tyto jevy podrobněji probrány. [8]

2.2.1 Magnetosféra

Až na označené výjimky je v této kapitole čerpáno z [7]. Zemská magnetosféra je velmi zjednodušeně obrovská dutina, která chrání Zemí před slunečním větrem. Dle [9] je zdrojem magnetického pole kolem Země její tekuté jádro, které díky rotaci vytváří magnetický dipól. Avšak je to pouze jedna z teorií, skutečný původ není zatím znám. Osa tohoto dipólu není shodná s osou rotace Země a navíc se polohy magnetických pólů mírně mění. Tento „štít“ však není symetrický. Na denní straně sahá přibližně do vzdálenosti deseti poloměrů Země (asi 63 000 km), ale na noční straně to může být i sto poloměrů. Velikost a tvar je závislý na slunečním větru, konkrétně na:

- dynamickém tlaku, který je dán hustotou a rychlostí větru proudícího ze Slunce
- teplotním tlaku, který je také závislý na rychlosti a na teplotě slunečního větru
- meziplanetárním magnetickém poli – magnetickém poli, které je ze Slunce vynášeno slunečním větrem

Velikosti jednotlivých složek a jejich podíl na konečném tvaru magnetosféry se však velmi liší a největší roli zde hraje tlak dynamický.

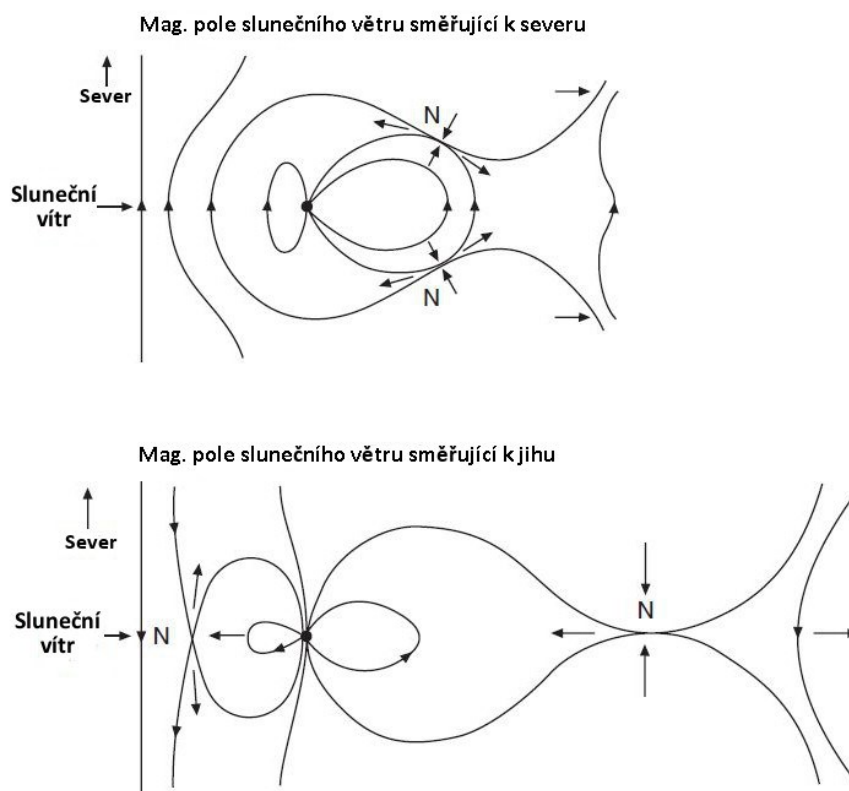
K interakci slunečního větru a magnetosféry se dá zjednodušeně přistupovat stejně jako by šlo o proudění kapaliny nebo plynu. Tok částic slunečního větru tlačí na neprostupnou magnetosféru, ta pod tímto nápořem mění svůj tvar a sluneční vítr v podstatě obtéká kolem ní. Přesto se ne všechna energie slunečního větru Zemí vyhne, ale část se absorbuje. A to jednak průnikem nabitých částic skrze magnetosféru do atmosféry (difuzí nebo výměnou nábojů) nebo magnetickým přepojením neboli rekonexí.

Sluneční vítr a magnetosféra mají docela rozdílné zdroje svých magnetických polí a těžko si představit, že se dokáží spojit, ale přesto se tak děje. Do jaké míry se dokáží spojit, závisí převážně na jejich vzájemných směrech magnetických polí. Pokud jsou tato pole antiparalelní je rekonexe největší. Vzhledem k tomu, že jsou tato magnetická pole trojrozměrná, vždy se najde nějaká oblast, která tuto podmínku splňuje.

Na obr. 2.2 jsou znázorněny dva krajní případy rekonexe. Na horním obrázku je to případ, kdy je směr meziplanetární magnetické pole na denní straně Země rovnoběžný s magnetickým polem magnetosféry. Sluneční vítr obtéká magnetosféru a v ohonu magnetosféry, kde jsou pole antiparalelní, dochází k jejich přepojení. Plocha, kde k tomuto přepojení dochází, je však poměrně

malá, magnetické pole je slabé a ačkoliv se jedná o důležitý jev, nedochází k silnému propojení těchto dvou polí a k velkým přenosům energie, jako v případě obrázku dolního.

Zde, kdy směřuje meziplanetární magnetické pole k jižnímu pólu Země, je rekonexe mnohem prudší. Díky antiparalelním polím dochází k rekonexi v podstatě po celé denní části, magnetické pole je mnohem silnější a dochází tak mnohem většímu přenosu energie ze slunečního větru do magnetosféry. Kromě toho navíc dochází v menším měřítku opět k rekonexi i na noční straně. Tato rekonexe na noční straně může mít i další vyznám a to vznik tzv. subbouří, kdy se energie strádá v ohonu magnetosféry a následně může být vypuštěna do magnetosféry na noční straně. To se děje v případě, že se směr magnetického pole větru náhle otočí, oblast rekonexe v ohonu magnetosféry se pak přibližuje blíž a blíž k Zemi a magnetické pole se tímto zesiluje.



Obr. 2.2 Rekonexe [7]

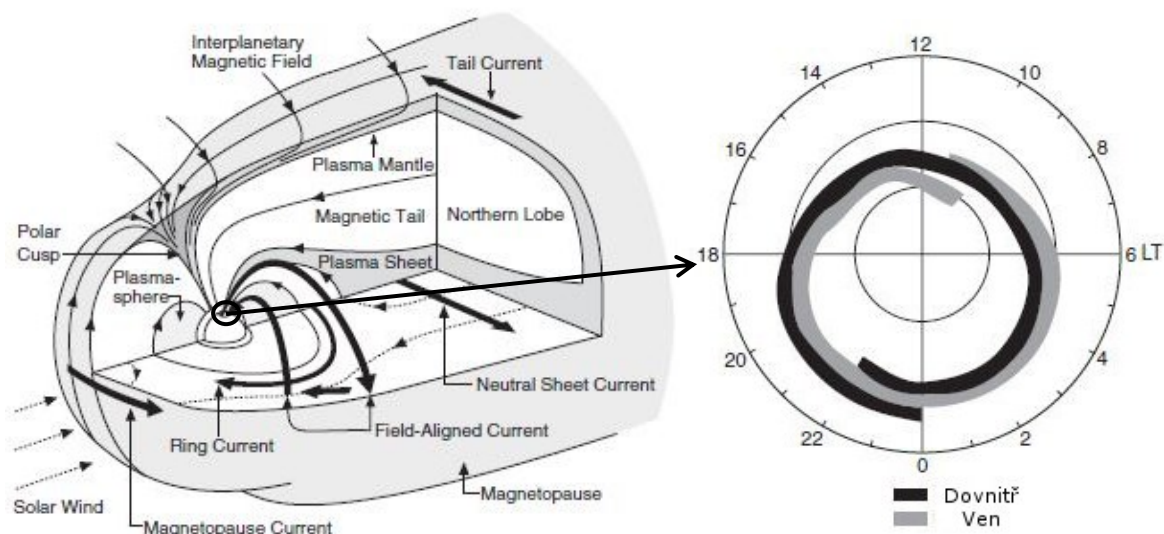
Proudy magnetosféry

Plazma solárního větru a jeho magnetické pole zapříčiní vznik elektrického pole

$$\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (2.1)$$

v magnetosféře a vytvoří složitý propojený systém polí a proudů, jak je znázorněno v řezu magnetosféry na obr. 2.3 vlevo. Obzvláště důležité je si všimnout field-aligned proudů, které se uzavírají napříč magnetickými siločarami v ionosféře. Lorentzova síla spojená s těmito proudy vtahuje plazma do ionosféry. Skrze tyto proudy tak může být energie přenášena z vnější magnetosféry až do ionosféry.

Obr. 2.3 vpravo je pohled shora na Severní pól a ukazuje polaritu proudů vstupujících a vystupujících z magnetosféry do ionosféry. Je zřejmé, že jsou spirálovitě stočeny okolo pólu s opačnými směry toku na ranní a večerní straně.

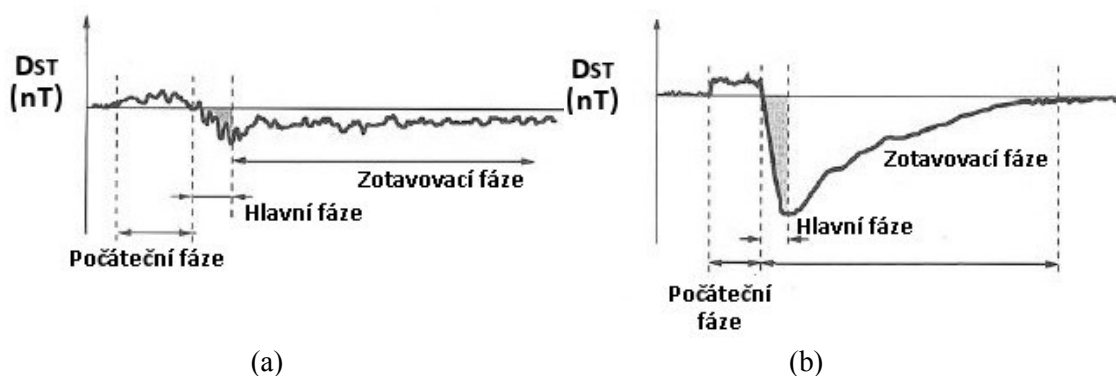


Obr. 2.3 Proudů magnetosféry [7]

CME

Výše popsané jevy v magnetosféře byly popsány spíše pro normální stav toku slunečního větru bez výraznější sluneční aktivity. V takových případech proudí sluneční vítr ze Slunce rychlostí okolo 400 km s^{-1} při slunečním větru označovaném jako pomalý a až 800 km s^{-1} při slunečním větru rychlém. Hustota pomalého a rychlého slunečního větru je přibližně 5, respektive 9 částic na centimetr krychlový, tedy asi $5 \cdot 10^9$ krát méně než dýchátný vzduch. Samozřejmě i takový sluneční vítr má na změny geomagnetického pole vliv, protože se jeho intenzita neustále mění se změnami na Slunci, rotací Slunce, rotací Země apod. Avšak takovéto výkyvy jen velmi výjimečně způsobí bouře dosahující K_p hodnoty 7 (viz kapitola 2.2.4) a následky jsou z pohledu míry změn geomagnetického pole a následných způsobených škod v elektrizačních soustavách zanedbatelně malé.

Situace se však drasticky mění při výronu koronární hmoty, jak lze vidět na obrázku níže.



Obr. 2.4 Průběh magnetického pole při fluktuaci slunečního větru (a) a při CME (b) [7]

Na obr. 2.4 je znázorněn průběh D_{ST} indexu (vyhodnocuje horizontální složku magnetického pole Země) magnetické aktivity při magnetické bouři způsobené změnou toku slunečního větru a výronem koronární hmoty. Reakci zemského magnetického pole na takovou poruchu lze rozdělit do tří částí:

- Počáteční fáze, kdy se magnetické pole zesílí kvůli náhlé kompresi magnetosféry pod tlakem narážejících částic na denní straně
- Hlavní fáze, během které dochází k prudkému poklesu magnetického pole
- Fáze zotavovací, při níž se magnetické pole vrací pomalu do svých původních hodnot před bouří

Vznik CME zůstává neznámý. Průměrně se během výronu koronární hmoty vyvrhne ze Slunce do vesmíru asi $5 \cdot 10^{12}$ až $5 \cdot 10^{13}$ kg sluneční hmoty a to během několika desítek minut, maximálně pár hodin. Jen pro srovnání, sluneční vítr odnese ze Slunce v souhrnu za celý den hmotu o váze přibližně $1 \cdot 10^{14}$ kg. Průměrná rychlost CME je pak 400 km s^{-1} , ale byly zaznamenány i oblaka slunečního plazmatu šířící se rychlostí přesahující 3000 km s^{-1} . Tyto výrony nabývají velkých rozměrů, větších než je velikost samotného Slunce. [9]

Principy přenosu energie z CME do magnetosféry a ionosféry zůstávají v podstatě stejné, ale kvůli zmíněné vysoké rychlosti, velké hustotě (i více než 10krát větší než v případě slunečního větru) a silnějšímu magnetickému poli, dochází k mnohem většímu přenosu energie do magnetosféry. Rychlost a hmotnost způsobí mnohem větší tlak na denní straně magnetosféry a ta se může pod tímto tlakem k povrchu Země přiblížit jen na vzdálenost asi 6 zemských poloměrů. Dochází k silnějším přepojením magnetických polí a s tím spojeným mnohem silnějším odezvám ve formě protékajících proudů magnetosférou a ionosférou. [9]

2.2.2 Ionosféra

Procesy v magnetosféře ovlivňované slunečním větrem a popsané v předchozích kapitolách zapříčiní vznik dvou jevů v horní atmosféře – vnik nabitých částic z magnetosféry a proudění ionosférického plazmatu.

Z magnetosféry do ionosféry proniknou hlavně elektrony s energií několika keV. Spirálovitě padají okolo siločar geomagnetického pole, sráží se s neutrálními částicemi a ionty a ionizují atmosféru. Ionizace zvýší vodivost ionosférického plazmatu, zatímco prouděním plazmatu \mathbf{v} v magnetickém poli Země vznikne systém elektrických polí podle vzorce (2.1)

Ionosférické elektrické pole je kolmé ke geomagnetickému poli Země a ve středních a vysokých nadmořských výškách je jeho velikost přibližně konstantní. Na rozdíl od proudové hustoty \mathbf{J} , která se s výškou výrazně mění. [10]

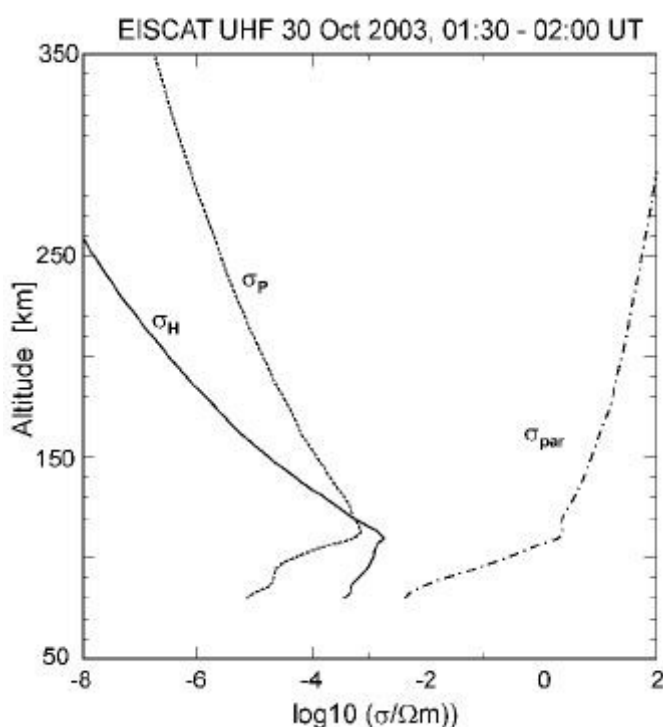
Proudy v ionosféře jsou způsobeny pohybem nabitých částic, což se dá pro ustálený stav zapsat jako

$$\mathbf{J} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{v}_p \times \mathbf{B}) \quad (2.2)$$

kde \mathbf{v}_p značí rychlost neutrálního plynu a σ je tenzor vodivosti.

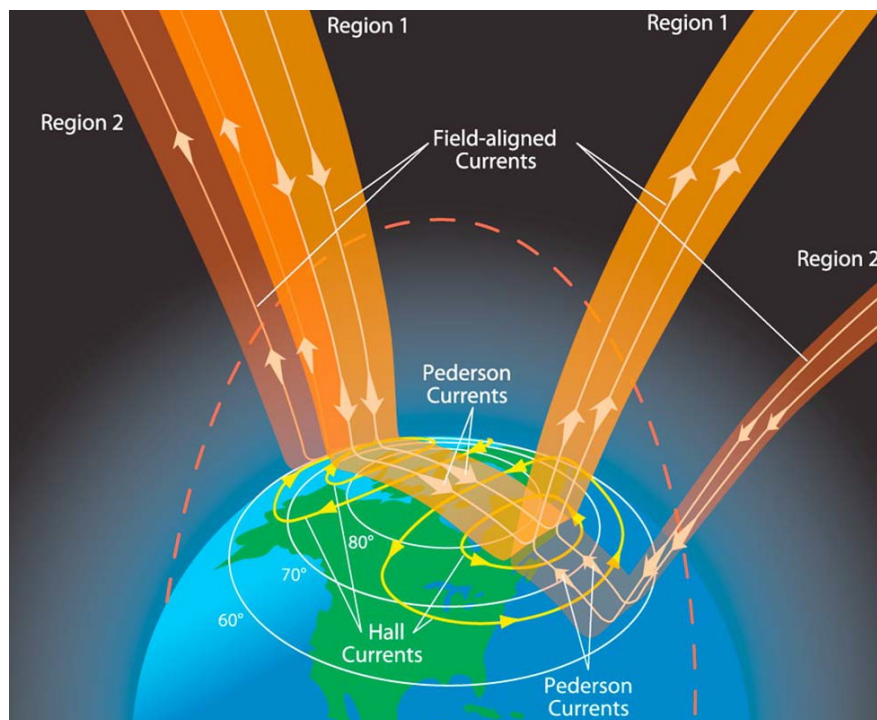
Tento tenzor se skládá ze tří složek:

- Pedersenova vodivost
- Hallova vodivost
- Paralelní vodivost



Obr. 2.5 Vodivosti ionosféry [7]

Všechny tyto vodivosti jsou závislé na hustotě elektronů, takže jejich zvýšený výskyt způsobený ionizací nabitých částic z magnetosféry, vede k velkým vodivostem a proudům. Zároveň jsou závislé na nadmořské výšce, jelikož četnost kolizí částic s nadmořskou výškou klesá. Z rozložení vodivosti v ionosféře na obr. 2.5 je vidět, že Hallova vodivost je největší ve výšce okolo 110 km a s dále rostoucí výškou vodivost rychle klesá. Pedersenova vodivost dosahuje nepatrně menších hodnot a s nadmořskou výškou vodivost klesá mnohem pomaleji. Jednoznačně nejvyšší vodivosti dosahuje vodivost paralelní. To nabádá k myšlence, že tam tečou i velké proudy, ale není tomu tak. Jak je patrné z obr. 2.5 a obr. 2.6, ve výškách pod 100 km razantně klesá vodivost a tento proud tak již dále neteče souběžně se siločarami geomagnetického pole, ale napříč magnetickým polem. Paralelní a Pedersenovy proudy jsou proto propojeny a amplituda paralelních proudů je tak i přes vysokou vodivost značně omezena a paralelní elektrické pole tak musí být velmi malé. [10]



Obr. 2.6 Proudly v ionosféře [11]

Obr. 2.6 v podstatě pokračuje tam, kde obr. 2.3 skončil a znázorňuje vliv field-aligned proudů na ionosféru. Lze vidět, jak se field-aligned proudy uzavírají přes Pedersenovy proudy, které tečou podél elektrického pole a kolmo k poli geomagnetickému. Kolmo na geomagnetické i elektrické pole tečou proudy Hallovy, známé také jako polární electrojety (Auroral Electrojets). Ty tečou na západ nebo na východ, uzavírají se přes pól a na rozdíl od Pedersenových, se tak kompletně uzavírají v ionosféře. Co se velikostí týče, Pedersenovy jsou větší ve výškách nad 125 km a Hallovy ve výškách pod 125 km. [10], [11]

Cesty Pedersenových proudů však nejsou moc známy, protože je lze jen obtížně změřit. Výšky okolo 100 km – 200 km jsou těžko dosažitelné jak pro letouny, tak pro satelity. Obvykle se ionosférické proudy dají nepřímo, ale poměrně snadno měřit pozemními měřicími stanicemi. Avšak kombinovaný obvod Pedersenových a field-aligned proudů nezanechává pod ionosférou žádné magnetické stopy a je pro pozemní stanice neviditelný. Z toho také vyplývá, že na konečném vlivu kosmického počasí na elektrizační soustavu a další takto zranitelné technické celky, tedy na indukci geoelektrického pole, se podílí hlavně Hallovy proudy neboli východní a západní electrojety. [10], [11]

Kromě změn geomagnetického pole na zemi, které jsou detailněji probrány následující kapitole, způsobí ionosférické proudy zahřívání ionosféry a polární záři.

Při průchodu proudů vzniká Joulovo teplo, ionosféra se zahřívá a expanduje do větších výšek. To je obzvláště nebezpečné například pro satelity operující ve výškách pod 500 km (například ISS – okolo 400 km). V normálním případě je v těchto výškách jen zanedbatelné tření díky velmi nízké hustotě vzduchu. Ovšem během magnetické bouře, kdy rapidně vzroste velikost proudů v ionosféře, se vlivem její expanze zvýší hustota v těchto výškách až desetinásobně. Satelity jsou

brzděny, mohou klesnout na nižší orbitu, mohou změnit svou orientaci a ztratit tak napájení nebo rádiové spojení. V krajním případě může dojít až ke zničení satelitu.

Polární záře je jediným viditelným aspektem kosmického počasí. Je způsobena nabitými částicemi pronikajícími do ionosféry. Ve výškách okolo 500 km až 90 km reagují tyto částice s ostatními částicemi atmosféry, hlavně s dusíkem a kyslíkem. Tyto prvky se vybudí a následně vyzařují energii v celém spektru, včetně viditelného světla. Největší vliv však na polární záře mají chemické reakce, které jsou těmito procesy způsobeny.

2.2.3 Povrch

Takže při změnách slunečního větru a hlavně při srážce CME se Zemí dochází k náhlým výkyvům proudů v magnetosféře a ionosféře. Z pohledu zemského povrchu jsou nejdůležitější proudy Hallovy tzv. electrojety. Časově proměnné proudy vytváří proměnné magnetické pole, které, indukuje na vodivém zemském povrchu geoelektrické pole. Toto elektrické pole zapříčiní vznik geomagneticky indukovaných proudů, které mohou téci i uzemněnými sítěmi, jako jsou elektrizační soustavy, ropovody a plynovody, telekomunikační kabely nebo železniční zařízení. Takto indukované proudy jsou v podstatě posledním článkem řetězu procesů, které započali v nitru Slunce.

V elektrických sítích mohou tyto proudy přesycovat transformátory, což může s návaznými vlivy vyústit až v rozpad sítě. U ropovodů a plynovodů mohou způsobovat korozi a poruchy ovládacích a bezpečnostních systému a stejně tak mohou způsobovat poruchy v telekomunikaci a vlakové dopravě.

Geomagnetické poruchy mohou trvat od sekund či minut, po hodiny až dny s frekvencemi nepřesahujícími 1 Hz s typickou hodnotou pod 0,01 Hz.

Jak silné geoelektrické pole bouře vyvolá a jak velký dopad bude bouře mít na elektrizační soustavu, závisí na několika okolnostech [3]:

- Intenzita magnetického pole a jeho orientace
- Nadmořská výška
- Odpor, délka a světová orientace vedení
- Geologické vlastnosti dané oblasti, včetně vodivosti země
- Konstrukce elektrizační soustavy

2.2.4 Vyhodnocování bouří

Při určování intenzity geomagnetických bouří se používá K a K_p index. Na měřicích stanicích po celém světě se magnetometry zaznamenávají horizontální složky magnetického pole Země. Hodnoty magnetického pole se zapisují v minutových intervalech a každé tři hodiny se z maxim a minim takto zaznamenaných hodnot stanoví největší odchylka za uplynulé tři hodiny. Podle velikosti této odchylky se následně určí index K dané měřicí stanice v rozsahu od 0 do 9. Z důvodu rozdílných geografických poloh měřicích stanic, má ale každá stanice svou vlastní přepočítávací tabulku. Index K_p je pak jen váženým průměrem K indexů ze všech měřicích stanic. [12]

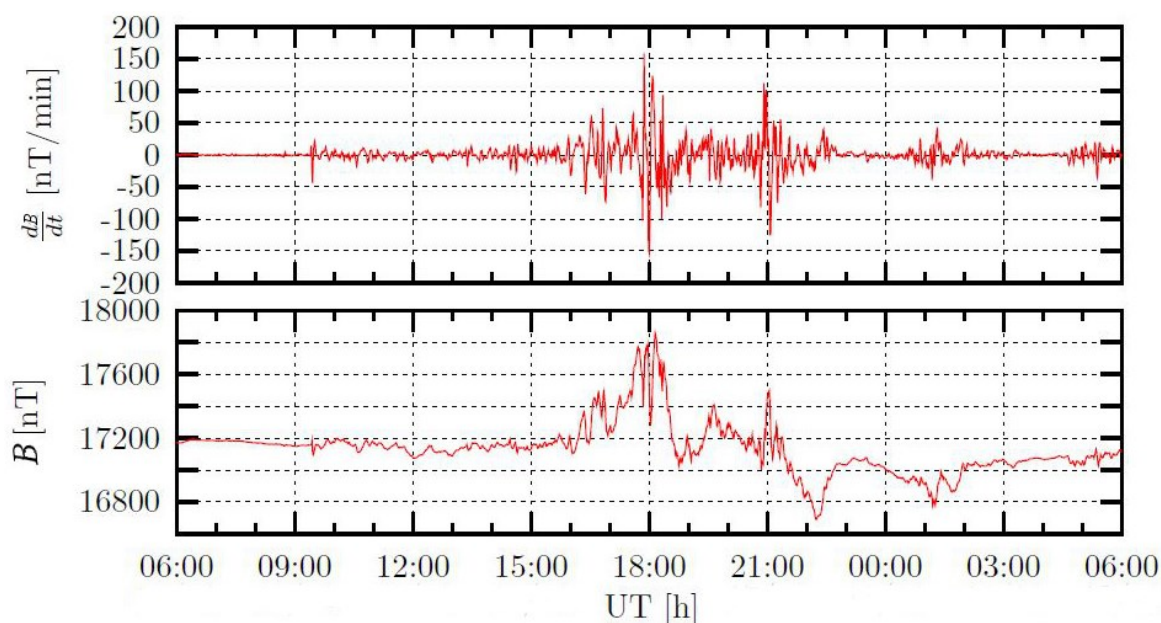
Pro přehlednější vyhodnocení rizik geomagnetických bouří, stanovil Národní úřad pro oceán a atmosféru (NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration) tzv. NOAA G-scale, ve kterém přiřadil jednotlivým K indexům závažnost jejich účinků. Toto rozdělení, včetně odchylek magnetického pole je k vidění v tab. 2.1.

Tab. 2.1 Vyhodnocení bouří dle NOAA [13], [12]

Stupeň bouře		K (-)	Největší odchylka (nT)	Četnost během 1 cyklu* (-)
Není vyhodnoceno jako bouře		< 4	40 - 70	-
G1	Slabá	5	70 - 120	1700
G2	Mírná	6	120 - 200	600
G3	Silná	7	200 - 330	200
G4	Velmi silná	8	330 - 500	100
G5	Extrémní	9	> 500	4

* 1 cyklus = 11 let

Toto vyhodnocení sice dokáže určit velikost bouře, ale má několik omezení. Nejvyšší stupeň je dán jako odchylka magnetického pole větší než 500 nT. To sice pokryje naprostou většinu zaznamenaných bouří, ale už nedokáže rozlišit ty opravdu velké. V historii byly totiž zaznamenány bouře vyvolávající i násobně přesahující odchylku 500 nT. Dalším nedostatkem je samotný způsob vyhodnocování založený na 3hodinovém intervalu. Z pohledu vlivu geomagneticky indukovaných proudů na přenosovou soustavu je totiž důležitý i samotný průběh. Je rozdíl, zdali dojde ke změně geomagnetického pole o stovky nT během pár vteřin nebo během dvou hodin. Z toho důvodu se k podrobnější analýze používají přímo zaznamenané průběhy nebo navíc i jejich časové derivace jako na obr. 2.7. [14]



Obr. 2.7 Průběh geomagnetického pole [15]

3. VLIV GEOMAGNETICKÝCH PORUCH NA PŘENOSOVOU SOUSTAVU

V předchozí kapitole bylo vysvětleno, jakým způsobem ovlivňuje kosmické počasí Zemi a bylo popsáno, proč a jak se na zemském povrchu indukují geoelektrická pole, která postihují rozlehlé oblasti.

Tato kapitola se zabývá důsledkem těchto elektrických polí na rozsáhlé systémové celky a hlavně pak na přenosové soustavy.

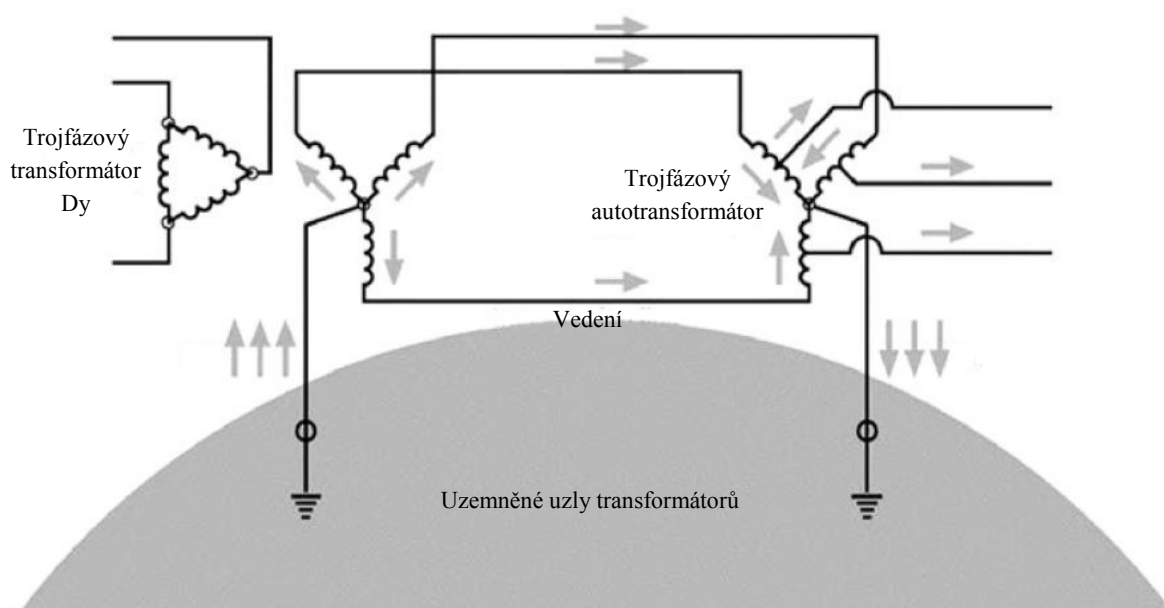
Na zemi je tedy indukováno elektrické pole a zemí teče elektrický proud. Ten teče nejmenším odporem a kovové konstrukce jsou mnohem lepším vodičem, než zemská půda. Tyto technologické systémy, tak v podstatě zkratují naindukované geoelektrické pole. Intenzita takto naindukovaného pole dosahuje hodnot nanejvýš v řádu několika voltů na kilometr. Proto jsou těmito proudy negativně postiženy hlavně územně velmi rozsáhlé technologické sítě, mezi jejichž konci vznikají dostatečně velká napětí a tečou tak jimi i velké proudy. [15]

Prvními lidskými výrobky, kterými tyto proudy tekly, pravděpodobně byly železniční koleje. Ale jelikož ještě nebyla elektřina v jejich počátcích příliš známa, natož využívána ve vlakové dopravě, nemohl být výskyt těchto proudů ani zaznamenán. Poprvé tak byly toky těchto proudů zaznamenány ve 40. letech 19. století v telegrafních vedeních, které byly díky geomagneticky indukovaným proudům funkční dokonce i bez připojených baterií a v některých místech docházelo vlivem těchto proudů i k požárům. S rozrůstající se elektrickou infrastrukturou, pak následovaly pozorování negativních vlivů těchto proudů v elektrických sítích nebo telekomunikačních kabelech. [2], [4]

V dnešní době se toho v tomto ohledu moc nezměnilo. Přetrvává zranitelnost elektrických sítí, což je možná dnes ještě nebezpečnější z důvodu, že jsou dnes na elektrické energii závislá takřka všechna odvětví lidské činnosti. Problémy způsobené geomagneticky indukovanými proudy přetrvávají i u telekomunikačních kabelů a to i u těch optických, protože hrozí ztráta napájení opakovačů. [8]

Problémy geomagneticky indukované proudy způsobují i v dlouhých plynovodech a ropovodech. Tam dochází vlivem proudu tekoucího kovovými rourami k poruchám bezpečnostních a monitorovacích systémů a dochází ke zvýšené oxidaci. Nově přibyla již jednou zmíněná železnice. Na rozdíl od minulosti totiž dnes slouží koleje i k monitorování vlakových souprav a proud tekoucí kolejemi může způsobit poruchu těchto systémů. Byly zaznamenány případy, kdy byly uvedeny v činnost závory a signalizační zařízení a kdy byl na trati monitorovacím systémem detekován vlak, i když tam ve skutečnosti žádný nebyl. [8]

Co se přenosových soustav týče, základní schéma toku geomagneticky indukovaných proudů lze vidět na obr. 3.1.



Obr. 3.1 Tok GIC v síti [7]

Z tohoto znázornění toku geomagneticky indukovaných proudů v elektrické síti je jasné, že proud do sítě vtéká ze země přes uzemnění uzlů transformátorů, symetricky se rozdělí mezi fázová vinutí a dále teče vedením do dalších transformátorů a přes jejich uzemněné uzly zpět do země. Aby tedy tekla obvodem proud, musí být síť spojena alespoň ve dvou místech se zemí. GIC tak nemohou téct v izolovaných sítích.

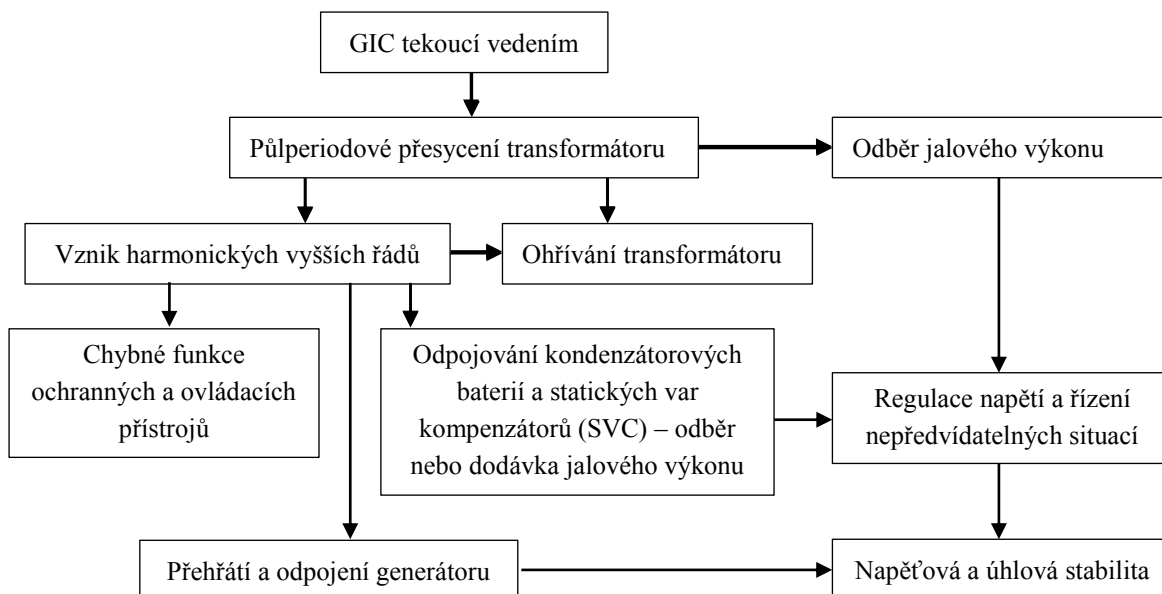
V [16] je ale uvedena výjimka, kdy geomagneticky indukované proudy mohou vedením téct i tehdy, pokud není ono vedení na svých koncích spojeno se zemí. A to v případě horizontální smyčky, ve které se časovou změnou magnetického pole může naindukovat napětí a téct proud. Jako příklad uvádí smyčku o poloměru 100 km, měrném odporu $8 \text{ m}\Omega \text{ km}^{-1}$ a působící změně magnetického pole 10 nT s^{-1} . V takovém případě je uvedeno, že má naindukované napětí velikost 314 V a smyčkou teče proud 63 A.

Obr. 3.1 dále bere v potaz i autotransformátory, u kterých nejsou primární a sekundární vinutí galvanicky oddělená. Geomagneticky indukované proudy se tak nemusí uzavírat pouze uzemněnými uzly transformátorů na stejné napěťové hladině, ale mohou téct i z jedné napěťové hladiny do druhé.

Jak již bylo zmíněno v předchozí části této práce, mají takto indukované proudy velmi malé frekvence, typicky hluboko pod 1 Hz. Vzhledem k systémové frekvenci sítě 50 Hz (popř. 60 Hz), jsou tyto proudy z pohledu sítě v podstatě stejnosměrné a bývají proto označovány jako kvazi-stejnosměrné. [3]

Tyto proudy pak mají nepříznivý vliv na jednotlivé prvky sítě, obzvláště na transformátory. Může dojít k nasycení transformátorů, vzniku harmonických složek v odebíraném proudu, ke změnám jalového výkonu, přehřívání transformátorů, nesprávné funkci ochran, odpojování vedení apod.

Tyto vlivy a jejich důsledky jsou přehledně znázorněny na obr. 3.2 a jednotlivé prvky sítě jsou následně probrány v navazujících kapitolách. [3]



Obr. 3.2 Vlivy GIC na přenosovou soustavu [3]

3.1 Transformátory

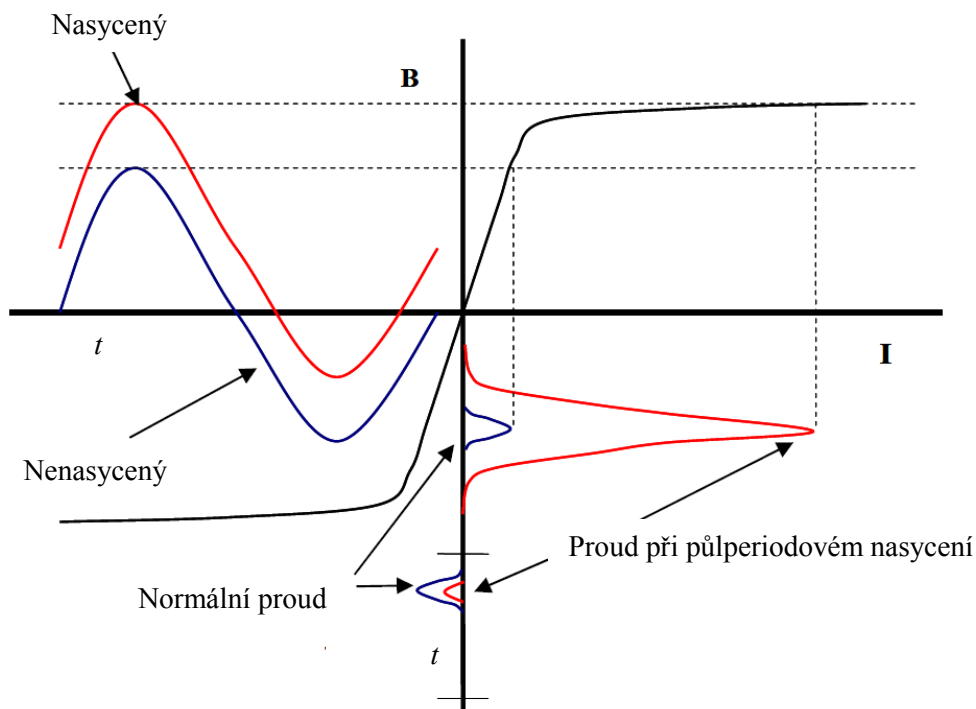
Geomagneticky indukované proudy mohou způsobit trvalé poškození transformátorů nebo snížit jejich životnost. Z pohledu sítě pak hrozí odchylky napětí a vznik sudých i lichých harmonických vyšších řádů. [17]

Magnetické vlastnosti jádra transformátoru nejsou lineární, ale od určitého bodu se magnetizační křivka výrazně odchýlí, protože dojde k nasycení jádra, které již není schopno vést daný magnetický tok. Transformátory jsou navrženy tak, aby se při běžném provozu pohyboval magnetický tok po lineární části magnetizační charakteristiky a nezasahoval nad oblasti kolen zmíněné křivky. [17]

Avšak při průchodu kvazi-stejnosměrných GIC vinutím transformátoru vznikne i stejnosměrný magnetický tok, jehož velikost závisí na velikosti stejnosměrného proudu či počtu závitů. Ten následně posune pracovní bod transformátoru v kladné či záporné části nad oblast kolen magnetizační charakteristiky. Při kladné nebo při záporné půlperiodě tak dochází ke chvilkovému nesymetrickému přesycení jádra. Tento stav bývá označován jako půlperiodové nasycení. [3], [17]

Při nasycení již není materiál schopen vést více magnetického toku. Razantně klesá permeabilita daného materiálu a ten již není pro magnetický tok tak dobrým vodičem. Dochází k většímu rozptylu magnetického toku a ten se následně uzavírá nejen v samotném magnetickém jádře transformátoru, ale z velké části také v okolních částech transformátoru, které pro to nejsou primárně určeny. Vířivé proudy v těchto částech následně způsobují oteplení, jak je popsáno níže

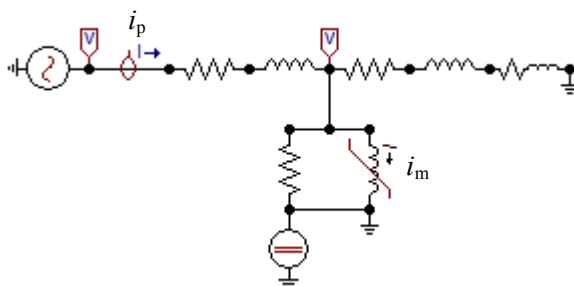
v této kapitole. Hlavně má však nasycení za následek zvětšení magnetizačního proudu, jak je znázorněno na obr. 3.3. [17]



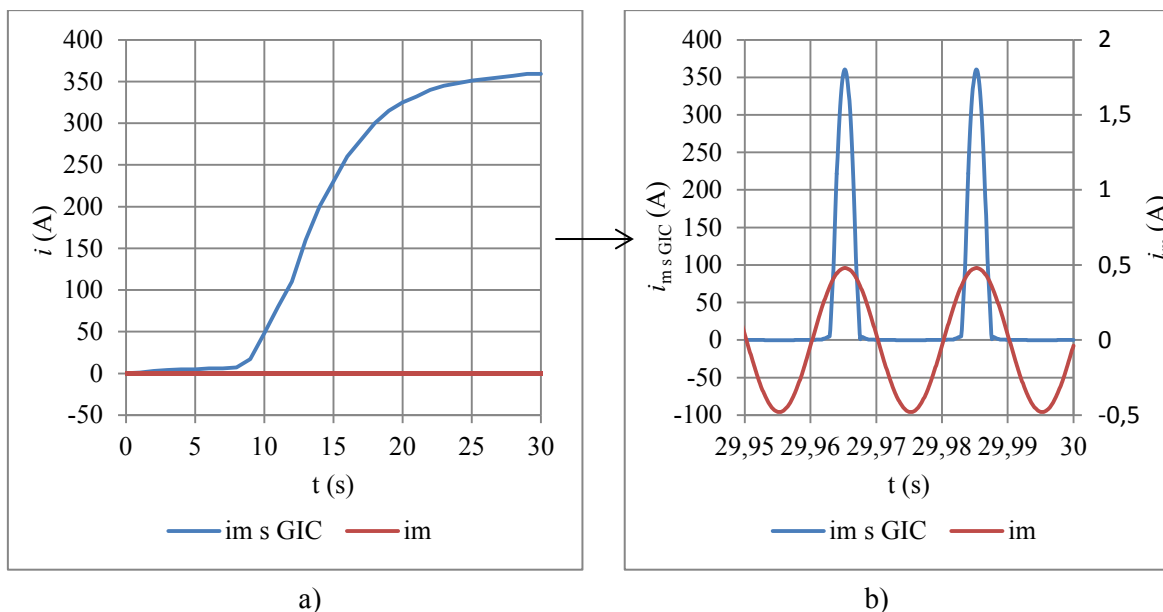
Obr. 3.3 Závislost magnetické indukce a magnetizačního proudu [3]

Magnetizační proud se tak vlivem této saturace stává nesymetrickým s relativně velkými proudovými špičkami. Ty trvají jen okolo 1/6 až 1/10 doby jedné periody, ale dosahují velkých hodnot. Čím větší je stejnosměrný magnetický tok, respektive stejnosměrný proud, tím větší jsou i tyto špičky. [3]

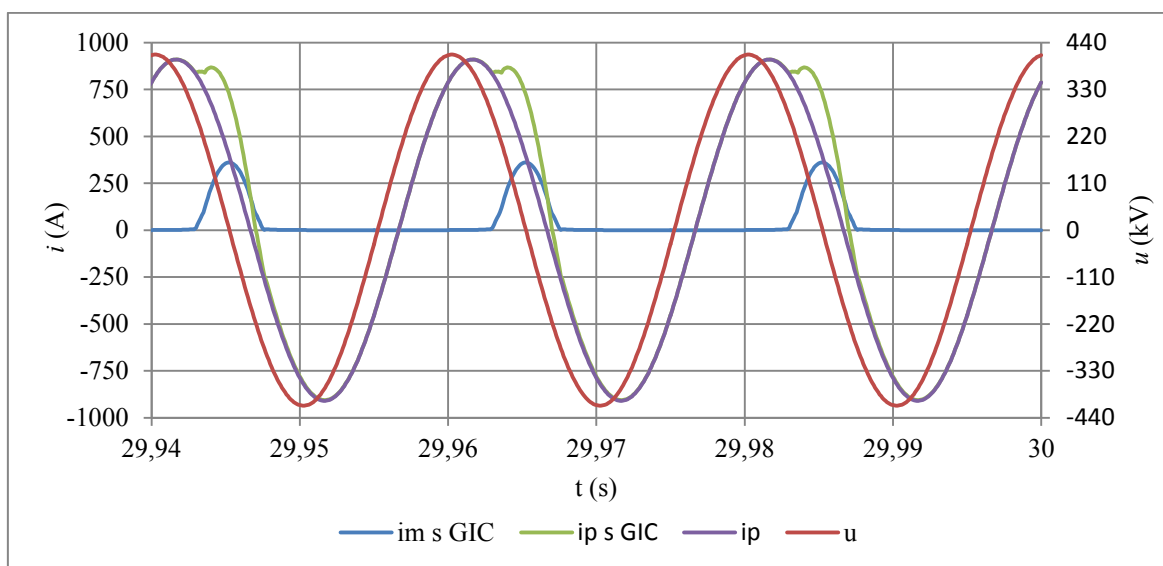
Průběhy lze názorně ukázat na následujícím ryze ukázkovém modelu transformátoru, jehož parametry vycházejí z [18]. Transformátor má nelineární magnetické jádro, je připojen ke střídavému zdroji s napětím 303 kV a je k němu připojena zátěž 200 MV·A s účínkem 0,9. Byly měřeny dva stavy a to s připojeným stejnosměrným zdrojem o napětí 50 V, který zajišťuje tok stejnosměrného proudu o hodnotě 50 A a normální chod, bez stejnosměrného proudu.



Obr. 3.4 Model ilustračního transformátoru v programu EMPT-ATP



Obr. 3.5 Obálka (a) a srovnání magnetizačních proudů (b)



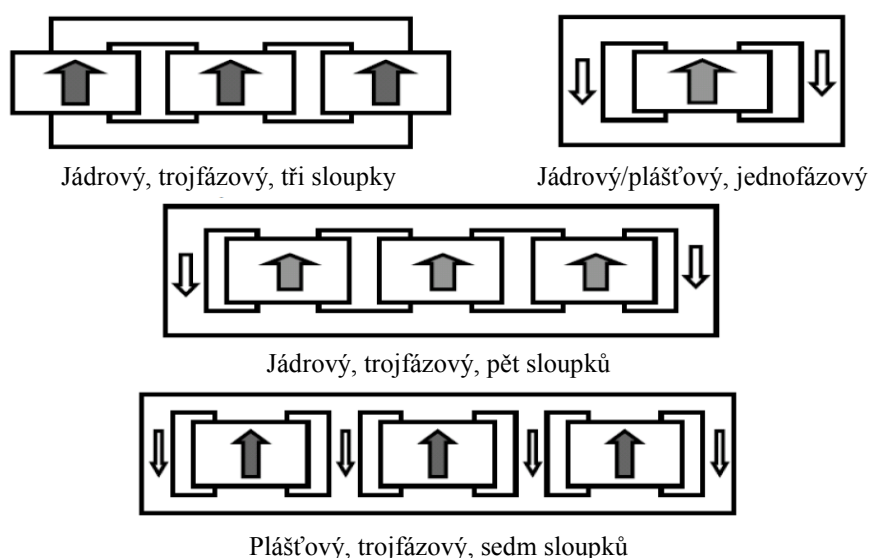
Obr. 3.6 Průběhy proudů a napětí

Z obr. 3.5 lze jasně vidět, k jakému zvýšení magnetizačního proudu při průchodu stejnosměrného proudu transformátorem dochází. Z amplitudy 0,5 A při normálním chodu vzroste proud v tomto případě až na 360 A, ale pouze na krátký okamžik. Zároveň i tento graf ukazuje, že k nasycení a vzrůstu proudu nedochází ihned, ale magnetizační proud postupně vzrůstá a až za určitou dobu se ustálí.

Obr. 3.6 následně ukazuje, jak tento magnetizační proud ovlivňuje celkový odebíraný proud. Magnetizační proud má ryze induktivní charakter, jak je také zřejmé z fázového posuvu o 90° , a způsobuje tak zvýšení odběru jalového výkonu. Nepříjemný je také fakt, že toto zvýšení odběru jalového výkonu není kontinuální, ale dochází k němu v pravidelných impulzech.

Faktory ovlivňující vliv GIC

I v případě stejných výkonů a stejných napěťových hladin, může mít stejná velikost stejnosměrného proudu u různých transformátorů různé důsledky. Velký vliv na to má především typ jádra. Velikost stejnosměrného posuvu v jádře závisí na magnetickém odporu obvodu, ve kterém se uzavírá stejnosměrný magnetický tok. Nejohroženější jsou tak jednofázové transformátory, protože je lze stejnosměrnou složkou snadno nasytit. Na uspořádání jádra zde moc nezáleží, neboť všechny typy vykazují podobné chování. Naopak nejodolnější je transformátor trojfázový se třemi sloupky, protože se stejnosměrný tok ve sloupcích vzájemně vyruší a možný magnetický obvod skrze nádobu má velkou reluktanci. K nasycení magnetického jádra je tak potřeba větší proud. Avšak platí to jen pro typ se třemi sloupky, jiné typy, například s pěti sloupky, se již chovají podobně jako transformátory jednofázové, protože se v nich lze stejnosměrný magnetický tok snadněji uzavírat například přes vnější sloupky. Materiál jádra a typ spojů má také význam, ale již mnohem menší. [3], [17]



Obr. 3.7 Magnetické toky různými typy jader [3]

Harmonické magnetizačního proudu

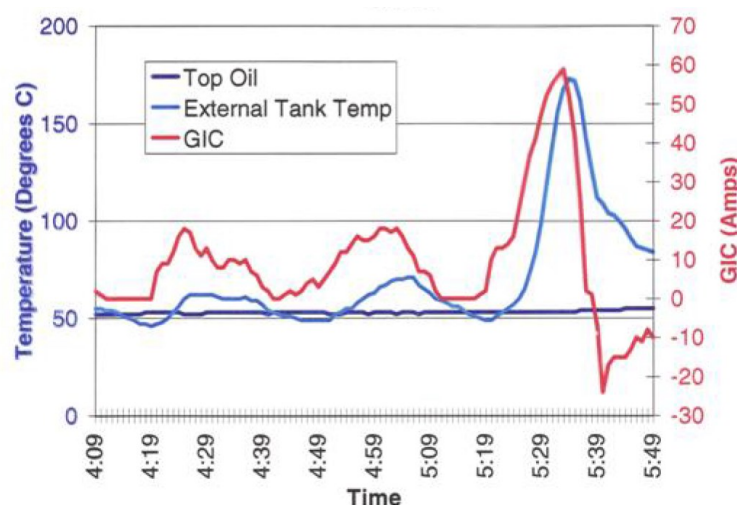
S různými typy jader transformátorů a jejich odolností na stejnosměrný proud souvisí i vznik harmonických složek v magnetizačním proudu. Jednotlivé typy jader mají různé tvary magnetizačních proudů. U jednofázových transformátorů má tvar jedné špičky za periodu, jako je znázorněno na obr. 3.5, ale u trojfázového transformátoru je již průběh složitější, protože dochází v jádře k rozdílným saturacím. Uvádí se, že trojfázový transformátor se třemi sloupky má při GIC větší amplitudy harmonických složek, které však s frekvencí rychle klesají. Ostatní transformátory mají harmonické rovnoměrněji rozdělené. [3], [17]

Teplota

Větší odebíraný proud a vyšší podíl harmonických složek způsobuje i větší ztráty ve vinutí, větší hysterezní ztráty či ztráty vířivými proudy, což dále vede k oteplování transformátoru. Jakmile způsobí GIC přesycení, magnetický tok se kromě samotného jádra začne také uzavírat přes ostatní části transformátoru, jako je například jeho nádoba. Vířivými proudy vzniká i v těchto částech

následně teplo. Dle [19] bylo zaznamenáno několik případů ohřívání transformátorů vlivem geomagnetické bouře i jejich následné selhání. Nejznámější je případ blokového transformátoru v jaderné elektrárně Salem během geomagnetické bouře roku 1989. Došlo k poškození vinutí, ale odstaven byl až týden po oné bouři. Během dvou let po této bouři bylo dále zaznamenáno několik dalších selhání transformátorů, pravděpodobně v návaznosti na tuto bouři. Dále bylo několik transformátorů odstaveno po bouři v Jihoafrické republice v roce 2003. Jeden transformátor selhal i na Novém Zélandu a dva ve Velké Británii. V mnoha případech však nebyly zveřejněny přesnější informace. [3], [17]

Na obr. 3.8 je záznam geomagneticky indukovaného proudu a teploty transformátoru v Meadowrooku v USA během geomagnetické bouře 10. 5. 1992.



Obr. 3.8 Průběh teploty transformátoru při vystavení GIC [3]

3.2 Generátory

Generátory nejsou přímo ohroženy kvazi-stejnosměrnými geomagneticky indukovanými proudy, jelikož bývají zapojeny do trojúhelníku. Avšak během geomagnetické bouře mohou být ovlivněny nepřímo, prostřednictvím napěťové nerovnováhy a harmonických vyšších řádů generovanými například blokovým transformátorem. Byly zaznamenány případy, kdy došlo k selhání generátoru vlivem geomagnetické bouře i případy přehřívání rotoru nebo chyb ochranných zařízení, které by mohly vést ke škodám nebo ztrátě výroby elektřiny během silné bouře. [3], [20]

Harmonické ve statoru vytváří také točivé magnetické pole. Hlavně druhá a osmá harmonická však vytvářejí magnetické pole, které se otáčí proti směru otáčení rotoru. V rotoru se tak indukují proudy, které jej zahřívají. Zároveň hrozí i zvýšení mechanických vibrací a torzního namáhání. Ochrany nejsou projektovány pro tyto zvláštní podmínky během geomagnetických bouří a jsou tak v těchto podmínkách nevyzpytatelné. [3], [20]

Dle [3] je v takových situacích vhodné snížit výkon generátoru, připojit další generátor kvůli rozložení výkonů na více strojů a zvýšit výrobní kapacity jalového výkonu.

3.3 Řídicí a ochranné zařízení

Při geomagnetické bouři mohou být řídicí zařízení a ochrany vystaveny harmonickým vyšších řádů a riziku přesycení měřicích transformátorů proudu. Nesprávným vyhodnocením situace může například dojít k odpojení, v daný moment, kriticky důležitých zařízení. Nevhodné odpojení vedení, transformátorů, kondenzátorových baterií apod. může napomoci k rozpadu sítě. [3]

Používá se široká škála přístrojů od starších elektromechanických po moderní mikroprocesorové. Elektromechanické jsou na geomagneticky indukované proudy háklivější než mikroprocesorové, protože nedokáží dobře odfiltrovat vyššími harmonickými zkreslené signály. Oba typy jsou citlivé na přesycení měřicích transformátorů proudu, avšak u elektromechanických je mnohem větší šance, že dojde k nevhodné akci. [3]

Podobně jako u systémových transformátorů i měřicí transformátory proudu se mohou přesytit. Jeho přesycení má za následek nepřesný převod signálu z primáru na sekundár měřicího transformátoru a do systémů závislých na tomto signálu se tak dostává velká chyba na vstupní straně. Tyto transformátory by měly být dimenzovány, aby bezpečně zvládly i zkraty se stejnou složkou a samotné geomagneticky indukované proudy, by tak při normálních chodu neměly činit obtíže a k saturaci by mohlo dojít jen při nepříznivém souběhu GIC a zkratových proudů. Avšak naopak [21] uvádí, že k přesycení MTP stačí i pouze geomagneticky indukované proudy a že u transformátorů zapojených do Dy se mohou proudy na obou stranách lišit a rozdílová ochrana, viz níže, tak může nevhodně vybavit. [3]

Rozdílová ochrana pracuje na principu 1. Kirchhoffova zákona, že součet proudů vtékajících a vytékajících z chráněné zóny musí být nulový. Pokud to tak není, ochrana působí. Přesycený měřicí transformátor proudu může předat ochraně zkreslené informace o proudech a ochrana tak může nevhodně vybavit. Opačný problém může nastat při vysokém podílu harmonických složek. Rozdílové ochrany transformátorů bývají od určitého harmonického zkreslení potlačovány nebo úplně blokovány, aby nedocházelo k nechtěnému vybavení ochrany. Avšak pokud dojde během takovéto blokace ke skutečné poruše, ochrana nemůže zareagovat nebo zareaguje pozdě. Naštěstí jsou transformátory vybaveny i dalšími ochranami, které mohou ochranu rozdílovou částečně nahradit. [3]

Na distanční, směrové nebo nadproudové ochrany má přesycení měřicího transformátoru proudu menší vliv než na ochranu rozdílovou. Při přesycení MTP mohou být proudy na sekundáru menší a fázově posunuté. To může vést k pomalejšímu vybavení ochrany. U směrových ochrany se nepředpokládá nevhodné vybavení vlivem saturace měřicího transformátoru proudu. [3]

Dále může při geomagnetické bouři dojít ke ztrátě GPS signálu, který slouží k zajištění přesného synchronizovaného času v ochranách. Tato zařízení však samozřejmě mají i své interní hodiny, které dokáží udržet relativně přesný čas i po dobu výpadku, takže se nedá říct, že by to mělo na síť velký vliv. Dalším aspektem jsou komunikační kanály mezi prvky sítě. Může dojít k výpadkům rádiového spojení i drátového spojení. Z tohoto pohledu se jeví jako nejspolehlivější optické kabely. [3]

3.4 Ostatní prvky

Důležitou roli mohou hrát během geomagnetické bouře vysokonapěťové kondenzátorové baterie, které jsou používány pro kompenzaci jalových výkonů a regulaci napětí. Vlivem harmonických vyšších řádů generovanými půlperiodově přesycenými transformátory může docházet u těchto kondenzátorů k přepětí a vyššímu proudovému namáhání. Čím vyšší frekvence, tím nižší kapacitní reaktance. Pro vyšší harmonické jsou proto kondenzátorové baterie nízko impedanční cestou a proudy tekoucí bateriemi tak mohou během geomagnetické bouře výrazně vzrůst. [3]

Dále dochází ve střídavých obvodech k vypínání při průchodu proudu nulou. Při dostatečně velkém kvazi-stejnosměrném geomagneticky indukovaném proudu by však nemuselo dojít k úspěšnému vypnutí. Je sice malá šance, že se tak stane, avšak dle [3] se to stát může. Další prvky jako jsou reaktory se vzduchovými jádry nebo samotné vodiče nejsou nijak ohroženy.

3.5 Síť jako celek

Z předchozích řádků vyplývá, že největším nebezpečím jsou transformátory. Jednak hrozí jejich samotné poškození nebo zničení, ale jsou v podstatě hlavním zdrojem všech dalších problémů, které geomagneticky indukované proudy v elektrické síti způsobují. Z pohledu napětí platí, že jsou ohroženy hlavně vvn a zvn sítě, protože mají obecně menší odpor a jsou delší.

Transformátory odebírají mnohem více jalového výkonu. Nejde však jen o jednotlivé stroje, ale toto postihne v jednu chvíli desítky a stovky transformátorů najednou. Dochází k výkyvům jalových výkonů a vzhledem k jejich provázanosti s napětím, dochází i ke kolísání napětí, na což musí reagovat regulátory. Harmonické vyšších řádů generované přesycenými transformátory ohrožují generátory, kondenzátorové baterie a řídicí zařízení či ochrany. Během geomagnetické bouře tak může docházet k v podstatě náhodným odpojováním, transformátorů, generátorů, kondenzátorových baterií a statických var kompenzátorů nebo vedení, což může dále destabilizovat síť a vyústit v celkový rozpad sítě.

Například při zatím nejhorší situaci došlo v Québecu v roce 1989 k rozpadu sítě de facto během 30 vteřin. Již během večera docházelo k nestabilitám v síti, ale vhodnými zásahy se napětí stabilizovalo. Před třetí hodinou v noci však během necelé půl minuty došlo k odpojení několika statických var kompenzátorů z důvodu nadproudů a přepětí, následovalo odpojení několika vedení a dvou transformátorů, došlo k velkému nepoměru mezi spotřebou a výrobou a celá síť Hydro-Québec se zhroutila. Za 9 hodin byla síť z 80 % opět v provozu. Během odpojení vedení také došlo k přepětí, jehož následkem vznikla škoda na zařízeních za 6,5 milionů dolarů. [5]

Ve Švédsku v listopadu roku 2003 bylo během geomagnetické bouře zaznamenáno několik odpojení vedení a transformátorů. Polovina těchto vybavení byla způsobena druhou harmonickou. Polovina odpojených zařízení byla opět automaticky nebo ručně připojena během 1 – 5 minut. Nejhorším důsledkem této bouře bylo odpojení vedení do města Malmö. Zpětně se zjistilo, že to bylo způsobeno zkreslením proudu vyššími harmonickými a ochranou, která byla asi 3krát citlivější na 3. harmonickou než na 1. harmonickou. [6]

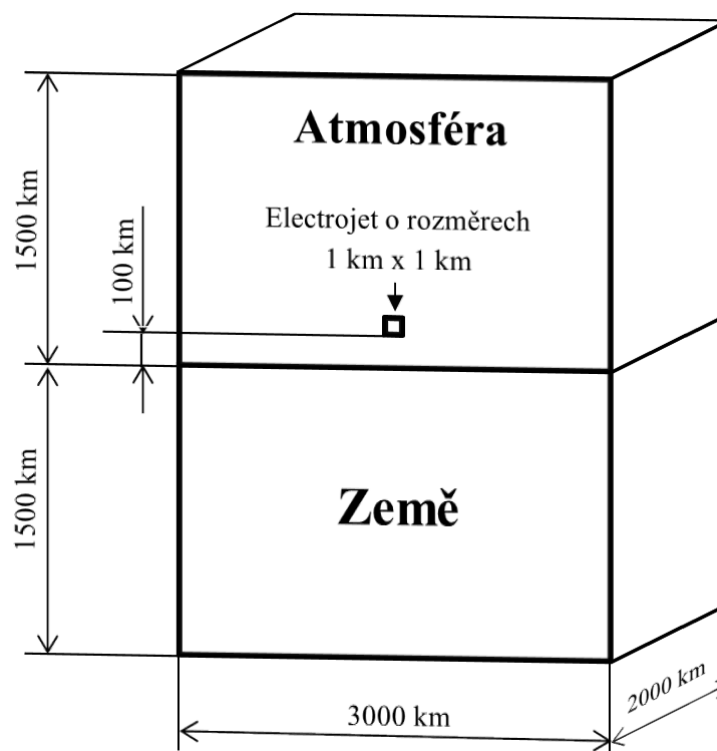
4. MODELOVÁNÍ GEOMAGNETICKÝCH PORUCH

Pro modelování naindukovaného geoelektrického pole na zemském povrchu je použit program pro řešení elektromagnetických polí ANSYS Maxwell společnosti Ansoft, který k výpočtům používá metodu konečných prvků. Tento matematický software umožňuje analyzovat elektrická a magnetická pole statická i časově proměnná. Z pohledu geometrického zvládá ANSYS Maxwell pracovat jak s dvojrozměrnými i trojrozměrnými modely.

4.1 Základní model

Při modelování geomagnetických poruch je nutné si nejprve určit, jakým způsobem takováto porucha vzniká, stanovit vhodný způsob výpočtu a jeho podmínky.

Z předešlých kapitol je známo, že geoelektrické pole je indukováno Hallovými proudy – electrojety, které tečou v ionosféře ve výškách okolo 100 km nad zemí. V první řadě se jedná o případ s velkými vzdálenostmi. Proud sice teče jen ve výšce 100 km, ale jeho magnetické pole sahá mnohem dál. Hlavně je ale důležité, aby se mohly siločáry svobodně uzavírat uvnitř modelovaného objektu a nedocházelo tak k deformacím polí a k následným velkým nepřesnostem ve výpočtu. Proto byly zvoleny větší rozměry a podobně jako v [22], [23] nebo [24] má celkový model strany o rozměrech jednotek tisíc kilometrů, jak je znázorněno na obr. 4.1.



Obr. 4.1 Rozměry modelu

Země je tedy reprezentována jako obdélník o stranách 1500 km x 3000 km x 2000 km a nad ním je rozměrově identický obdélník představující atmosféru. V prvním přiblížení lze k electrojetům

přístupovat jako k čárovému proudu ve zmíněné výšce 100 km nad zemí. S tímto zjednodušením pracují jak některé analytické - [25], [26], tak numerické výpočty - [22], [24]. V tomto prvním modelu je tak electrojet dán jako obdélník o stranách 1 km x 1 km x 2000 km se středem v počátku osy y, tedy uprostřed modelovaného objektu.

Podle [3] mohou v electrojetech při silných magnetických bouřích téct proudy o velikosti milionů ampérů. Oproti tomu v [7] je uvedena maximální hodnota přesahující pouze jeden milion ampérů. Stejná hodnota proudu, tedy 10^6 A se používá ve výpočtech například v [27], [22], [23] nebo [25]. Již v kapitole 2.2.3 byla zmíněna frekvence proudu pod 1 Hz, s typickou hodnotou pod 0,01 Hz. Podobné hodnoty (konkrétně 1 – 0,001 Hz) uvádí i [8]. Při výpočtech se pak nejčastěji používají frekvence právě z tohoto rozsahu - [24], [25] nebo frekvence ještě nižší - [22], [23]. Z těchto důvodů je proud electrojetu v tomto prvním modelu zadán jako proud sinusový s amplitudou 1000000 A a to pro dvě různé frekvence. Jednou s frekvencí 0,1 Hz a podruhé s frekvencí 0,001 Hz.

Co se materiálů týče, pro atmosféru bylo použito vakuum s nulovou vodivostí a relativní permeabilitou rovnou jedné. Pro zemi byly zvoleny opět dva případy. V obou případech má zem permeabilitu rovnou jedné, avšak liší se vodivostí. V jednom případě byla zvolena vodivost zemského povrchu $0,1 \text{ S m}^{-1}$ a ve druhém $0,001 \text{ S m}^{-1}$, což jsou dle litosférického modelu kontinentální Evropy v [28] opět přibližně hraniční hodnoty, ve kterých se vodivosti zemského povrchu pohybují.

Dvě rozdílné frekvence proudu a dvě rozdílné vodivosti byly zvoleny z důvodu srovnání vlivu těchto parametrů na výsledné geoelektrické pole.

Pro určení elektromagnetických polí se pro tento případ nabízejí dva typy výpočtu. Magnetický časově proměnný (magnetic - transient) nebo magnetický pro výpočet vířivých proudů (magnetic – eddy current). Prvně zmíněný má nevýhodu v tom, že je nutné nastavit dostatečně malý časový krok, aby byl schopen zachytit amplitudu sledovaného pole, a velké množství výpočtů se může nepříznivě projevit na době řešení úlohy. Dalším nedostatkem je, že Maxwell neumožňuje u tohoto typu výpočtu přímo určit hodnotu elektrického pole. To je nutné dopočítat pomocí interní kalkulačky z proudové hustoty a vodivosti dle následujícího vztahu

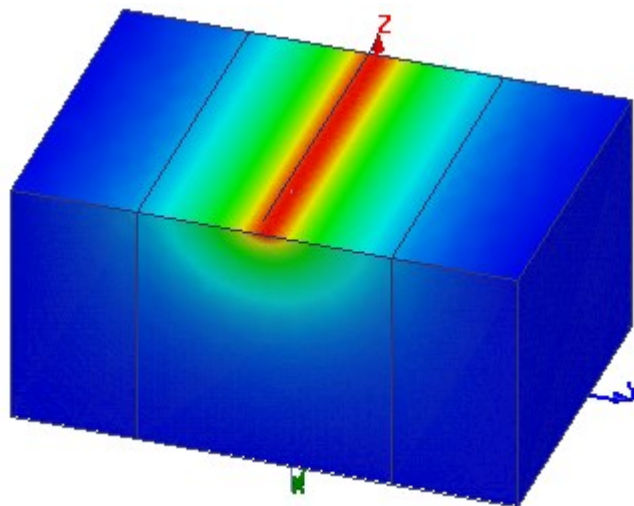
$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{J}}{\sigma} \quad (4.1)$$

Pro řešení tak byl použit druhý zmíněný typ výpočtu. Ten, na rozdíl od předchozího, není závislý časově, ale frekvenčně a lze tak i snadněji řešit více frekvencí v podstatě najednou. Další výhodou je možnost zobrazení elektrického pole bez dodatečných úprav. Tento typ výpočtu se tak zdál být pro modelování geomagnetických poruch vhodnějším.

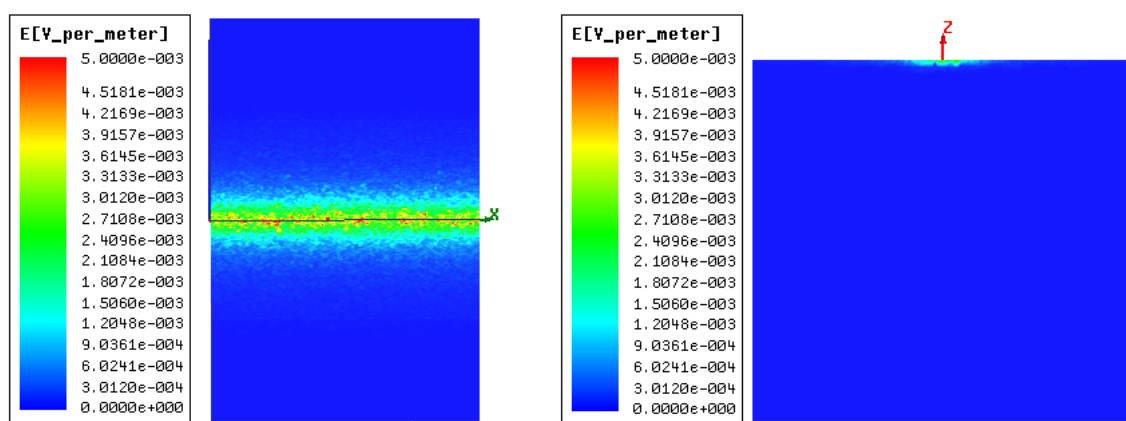
Jednou z dalších možností nastavení je jemnost početní sítě, na které také závisí přesnost celého výpočtu. Aby se výpočet zpřesnil a zároveň s tím nedošlo ke kritickému překročení limitů použitého hardwaru (nedostatek operační paměti), byl model rozdělen na menší části. Částem

v blízkosti electrojetu, tedy v místech z konečného pohledu nejzajímavějších, bylo zvýšeno množství elementů početní sítě na úkor míst vzdálenějších.

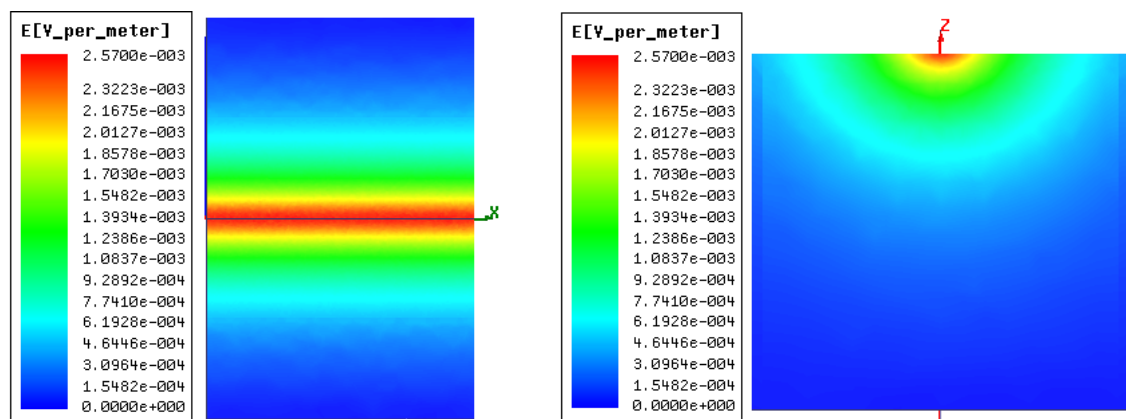
V následujících obrázcích a grafech jsou zobrazeny amplitudy geoelektrického pole.



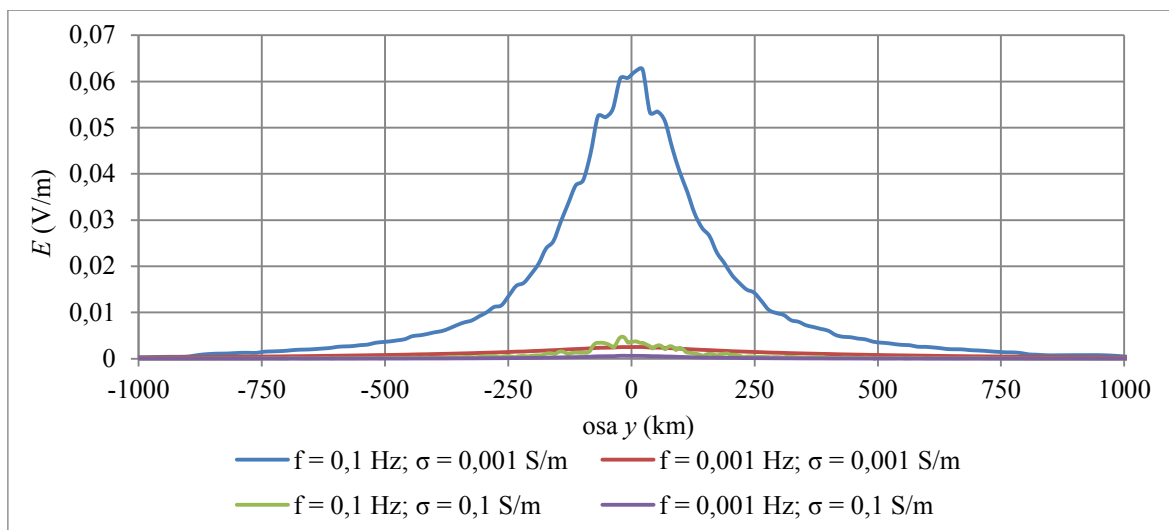
Obr. 4.2 Náhled na geoelektrické pole s electrojetem (bez atmosféry)



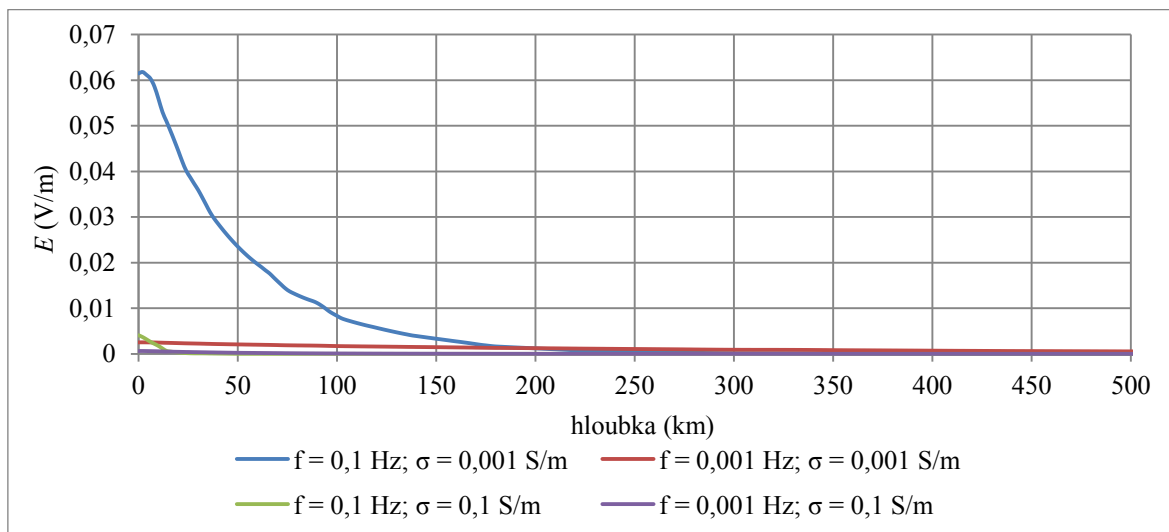
Obr. 4.3 Rozložení geoele. pole na povrchu a uvnitř Země pro frek. 0,1 Hz a vodivost $0,1 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$



Obr. 4.4 Rozložení geoele. pole na povrchu a uvnitř Země pro frek. 0,001 Hz a vodivost $0,001 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$



Obr. 4.5 Průběh intenzity geoelektrického pole v ose y



Obr. 4.6 Závislost intenzity geoelektrického pole na hloubce

Na obr. 4.3 a obr. 4.4 s rozložením geoelektrického pole a na grafech na obr. 4.5 a obr. 4.6, na kterých jsou znázorněny průběhy všech čtyř řešených případů a jejichž průběhy jsou kvůli nedostatečně jemné početní síti modelu poměrně kostrbaté, je vidět, že geoelektrické pole má větší intenzitu při vyšších frekvencích. To odpovídá Maxwellově rovnici

$$\text{rot}\mathbf{E} = -\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} \quad (4.2)$$

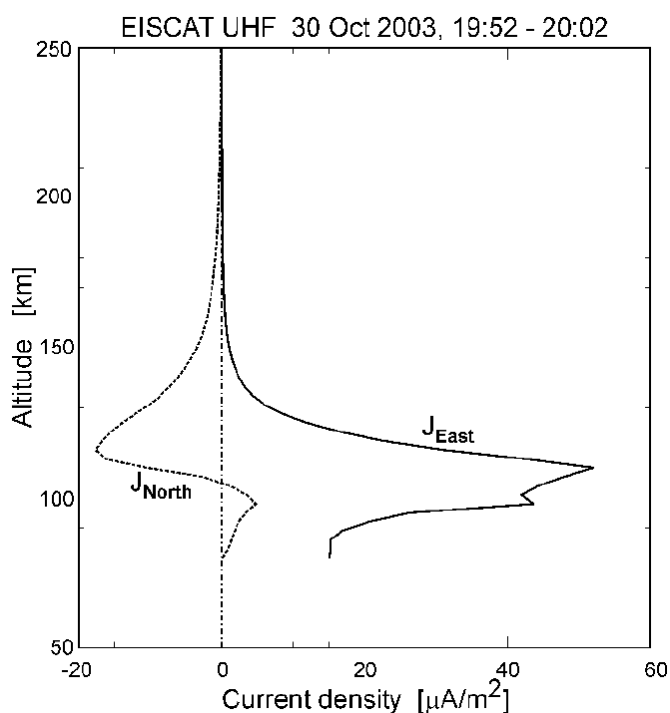
podle které je hodnota intenzity elektrického pole přímo závislá na časové změně pole magnetického a tak dosahuje intenzita geoelektrického pole u vyšších frekvencí vyšších hodnot. Dále je si možné všimnout, že u vyšších frekvencí je pokles geoelektrického pole se vzdáleností od elektrojetu mnohem strmější než u frekvencí nižších.

Na frekvenci spolu s vodivostí a permeabilitou je závislá i hloubka vniku. Je zřejmé, že s vyšší frekvencí a vyšší vodivostí klesá intenzita geoelektrického pole s hloubkou rychleji než v případě menší frekvence nebo menší vodivosti.

Další poznatek je, že v zemi s nižší vodivostí je geoelektrické pole silnější. Nejhorší kombinací tak jsou velké a rychle se měnící proudy nad oblastmi s nízkou vodivostí, jako jsou například oblasti s kamenitým podložím.

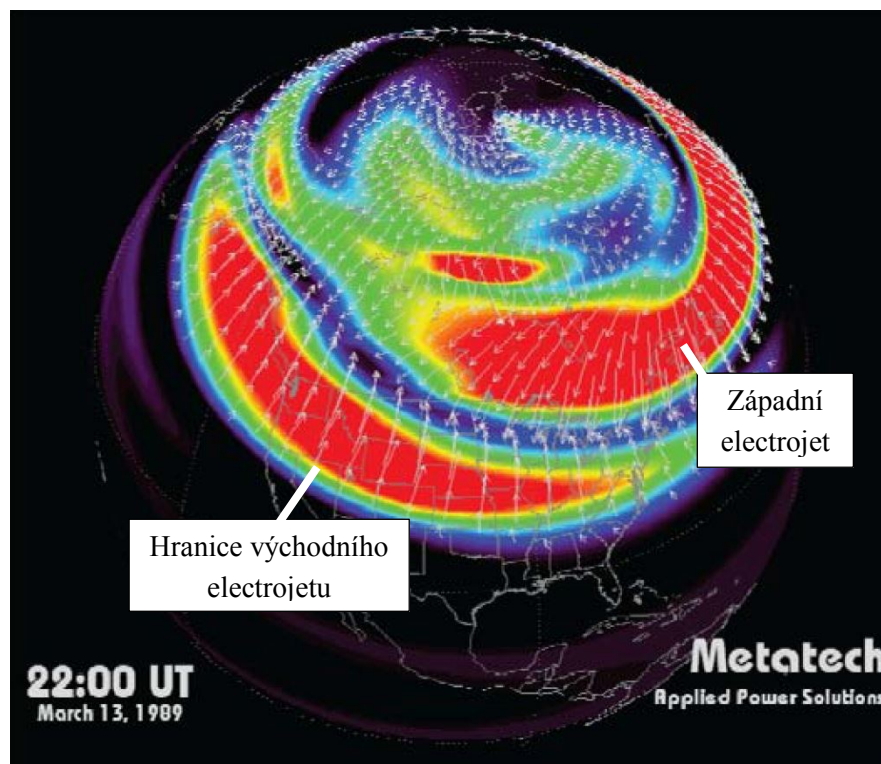
4.2 Přesnější model

Především model má však mnoho nedostatků. Předně je nutné si uvědomit, že electrojet není jen čárový proud, jako tomu bylo v předchozím případě, ale má nezanedbatelné rozměry. Z obr. 4.7 vyplývá, že proud teče ve výšce přibližně od 90 km do 130 km a je tedy vysoký asi 40 km.



Obr. 4.7 Proudová hustota východního a západního electrojetu [7]

Co se šířky electrojetu týče, v [7] je udaná typická šířka electrojetu okolo 100 km. Avšak v [29] je uvedeno, že šířka electrojetu typicky přesahuje 5° nebo 6° zeměpisné šířky. Po přepočtu na kilometry tedy asi 556 km až 667 km. Tomu přibližně odpovídá i rekonstrukce electrojetu během bouře v roce 1989 na obr. 4.8.

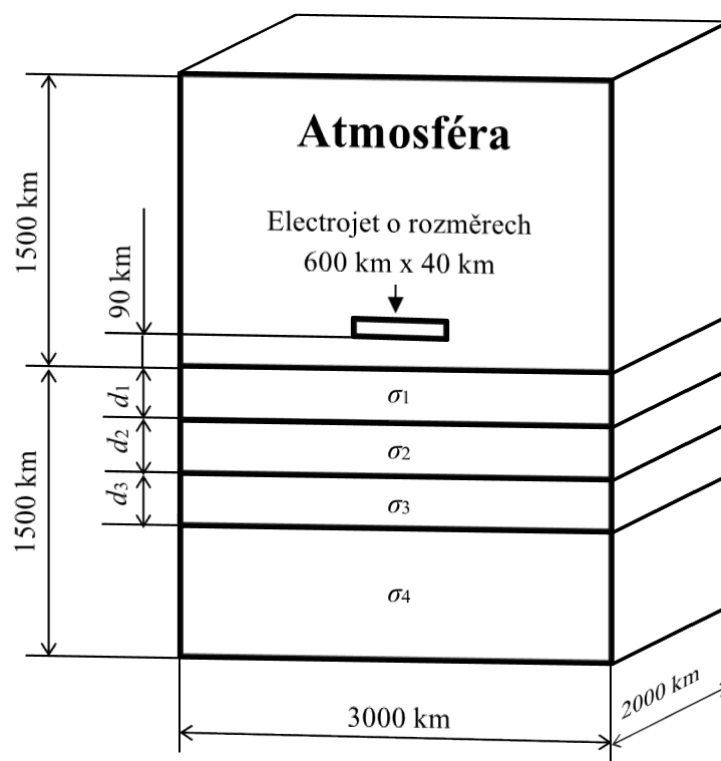


Obr. 4.8 Electrojety během bouře roku 1989 [30]

Dalším významným aspektem, který má vliv na výsledné geoelektrické pole a který byl v předchozím modelu velmi zjednodušen, je zemská vodivost. Ta byla reprezentována pouze jednou hodnotou pro celý objem představující Zemi. Avšak ve skutečnosti se zemská vodivost s hloubkou různě mění. Půda se skládá z několika materiálově rozličných vrstev s různou vodivostí. Nejenže se tak výsledné geoelektrické pole na povrchu změní, ale zemská vodivost je frekvenčně závislá. S frekvencí se mění hloubka vniku a rozdílné hloubky vniků zasahují do rozdílných vodivých vrstev.

Ve světle těchto skutečností jsou zmíněné důležité nedostatky v následujícím modelu již napraveny a model poslouží k určení napětí mezi uzemněnými uzly sítě.

Jak je vidět na obr. 4.9, electrojet tedy v tomto modelu již není zjednodušeně znázorněn jako čárový proud, ale má již reálné rozměry v souladu s poznatky vysvětlenými v předchozích několika odstavcích. Stejně se přistoupilo k úpravě modelu zemské vodivosti, při kterém se vycházelo ze studie evropské litosféry.



Obr. 4.9 Rozměry modelu

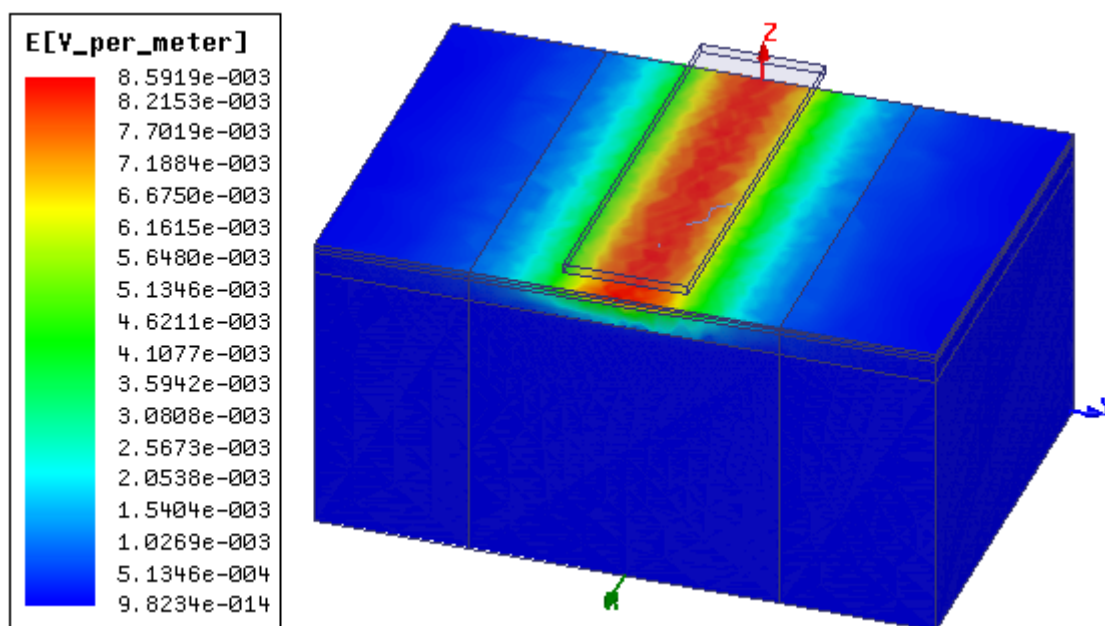
Tab. 4.1 Vodivé vrstvy [28]

Vrstva	Vodivost σ_i ($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)	Tloušťka vrstvy d_i (km)
1	0,0006	20
2	0,002	20
3	0,00125	110
4	0,1	>110

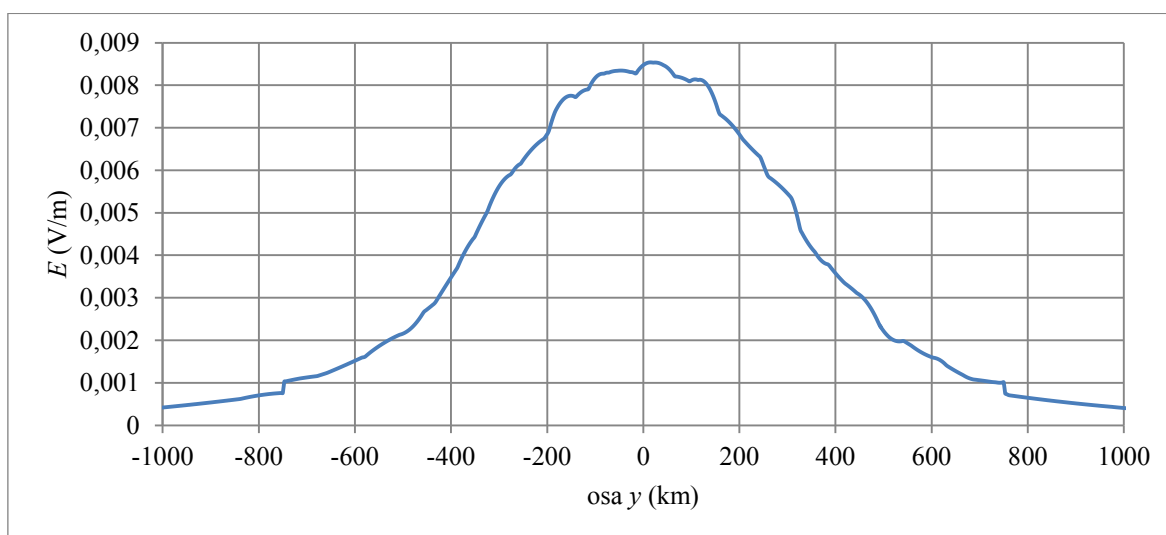
Rozměr electrojetu byl tedy zvolen 600 km x 40 km x 2000 km. Amplituda proudu zůstala stejná jako v předchozím případě a to milion ampérů. Na rozdíl od minulé simulace již nebylo řešeno více frekvencí, ale pouze jedna a to 0,01 Hz.

Z [28] byl vybrán model litosféry o čtyřech vrstvách a širokou škálou hodnot vodivosti. Tento zvolený vodivostní model odpovídá většině území České republiky.

Ostatní nastavení početního softwaru zůstala zachována. A tak stejně jako v prvním případě, i zde byl zvolen frekvenčně závislý typ výpočtu označovaný v Maxwellu jako Magnetic - Eddy Current. Stejně tak zůstal zachován i způsob vytvoření početní sítě, kdy je model rozdělen na více částí a ty blíže electrojetu obsahují více početních elementů.



Obr. 4.10 Rozložení geoelektrického pole

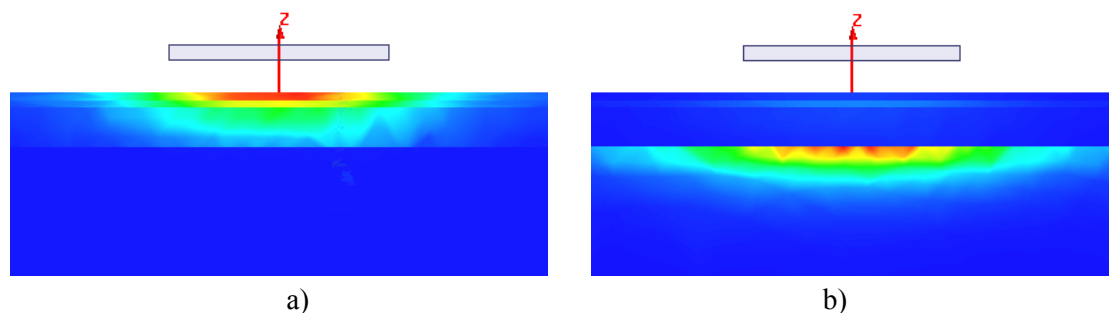


Obr. 4.11 Průběh intenzity geoelektrického pole podle osy y

Na první pohled asi nejvýraznější změna oproti předchozím simulacím je, že z důvodu rozměrově širšího elektrojetu dosahuje vysokých hodnot intenzity elektrického pole mnohem větší oblast zemského povrchu. Je to zřejmé i z průběhu na grafu, který ve srovnání s průběhy v grafech na obr. 4.5 postrádá výraznou špičku v bodě 0, ale naopak je elektrické pole po několik desítek kilometrů takřka stejně velké.

Z rozložení intenzity elektrického pole v nitru půdy na obr. 4.10 a v detailu na obr. 4.12a lze pozorovat změnu tohoto pole v rozdílných vodivých vrstvách. Největší intenzita pole je v první vrstvě, protože je to vnější vrstva a je nejbližší povrchu, ale také proto, že má zdaleka nejmenší vodivost. V dalších, lépe vodivých, vrstvách pak dochází ke skokovým poklesům intenzity. V nejspodnější a v tomto případě nejlépe vodivé vrstvě pak klesá hodnota elektrické intenzity náhle

až k nule. Zajímavě může být srovnání s rozložením proudové hustoty na obr. 4.12b, která má zcela opačný průběh a z které vyplývá, že geomagneticky indukované proudy tečou (pomineme-li zatím elektrická vedení a další povrchová průmyslová nebo přírodní vodivé cesty) v tomto případě převážně až v nejnižší vrstvě.

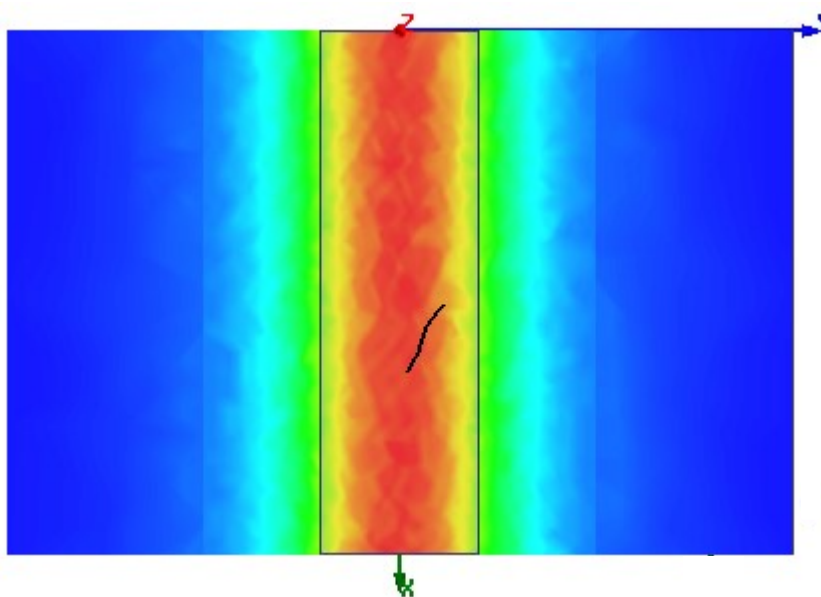


Obr. 4.12 Detail rozložení intenzity geoeel. pole (a) a proudové hustoty (b)

4.2.1 Výpočet napětí

Jak je detailněji vysvětleno v kapitole 3, během geomagnetické bouře tečou mezi uzly elektrické sítě geomagneticky indukované proudy. Ty jsou závislé na daném geoelektrickém poli, respektive napětí mezi těmito uzly. Dá se namítnout, že tyto proudy nejsou dány pouze geoelektrickým napětím, ale že při časové změně magnetického pole vyvolané ionosférickým electrojetem, se naindukuje proud i přímo ve vedení díky smyčce vedení - zem. Avšak v [15] je dokázáno, že kvůli velkému rozdílu výšky vedení a hloubky vniku zemského povrchu, je takto vyvolaný proud ve srovnání s proudem způsobeným geoelektrickým napětím, zanedbatelný. Ke stejnému závěru, byť rozdílným postupem, se došlo i v [8].

Na obr. 4.13 znázorněno zakreslení vedení v modelu. To je umístěno na povrchu modelu a skládá se ze tří částí s různě se svírajícím úhlem k ose electrojetu s celkovou délkou 300 km.



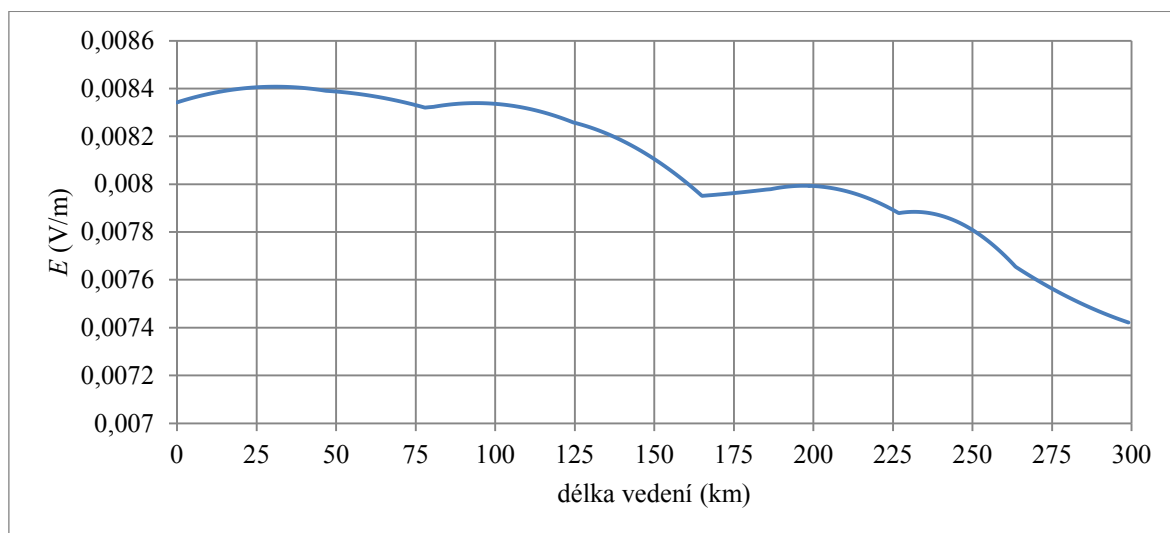
Obr. 4.13 Vedení v modelu

Dle [16] je geoelektrické pole dáno gradientem skalárního potenciálu φ a časovou derivací vektorového potenciálu \mathbf{A}

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi - \frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t} \quad (4.3)$$

Nenulová hodnota derivace znamená, že je toto elektrické pole nekonzervativní a jeho integrál, tedy napětí, závisí na integrační cestě. Nelze tak zvolit libovolný nulový bod potenciálu a integraci po libovolné cestě spočítat potenciál v jiných bodech. Znamená to tedy, že ke zjištění napětí mezi dvěma konci vedení není možné přistoupit tak, že se například v prvním bodě zvolí nulový potenciál a napětí mezi druhým bodem se vypočte jako integrál po přímce mezi těmito body. Pro výpočet napětí mezi uzly sítě je proto nutné integrovat geoelektrické pole podél daného vedení mezi nimi.

Na grafu na obr. 4.14 je znázorněn průběh intenzity elektrického pole podél vedení zaznačeného na obr. 4.13.



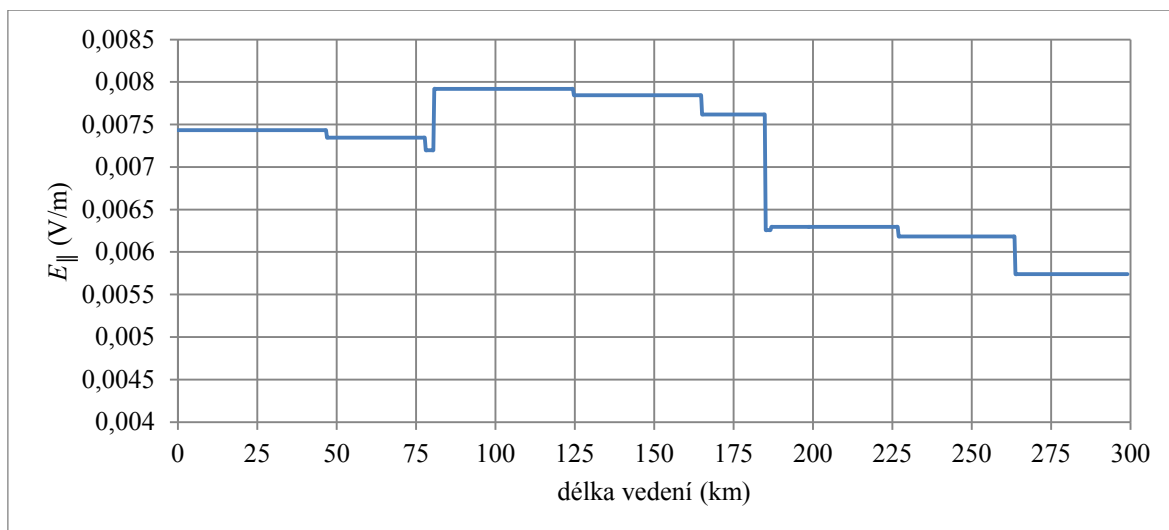
Obr. 4.14 Elektrické pole podél vedení

Podle odstavce výše se napětí mezi konci spočítá jako

$$U = \int_0^l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (4.4)$$

kde l označuje délku vedení.

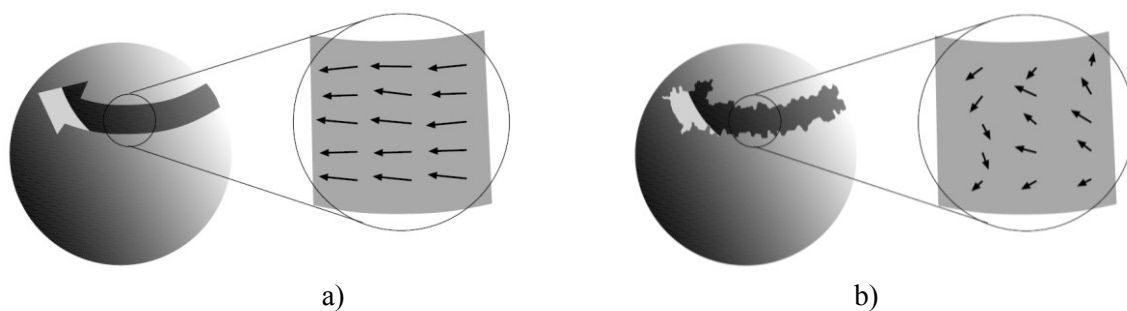
Aby bylo možné integrál spočítat, je nutné určit tečnou složku intenzity elektrického pole k vedení. Toho se docílilo pomocí interní kalkulačky programu Maxwell s názvem Field calculator. Příkazem Dot(<Ex,Ey,Ez>,LineTangent) a jeho přiřazením k zadanému vedení se spočítala tečná složka znázorněna na obr. 4.15. Jelikož Maxwell neumožňuje při takovéto práci s geometrií další úpravy, je průběh tvořen surovými daty bez vyhlazení.



Obr. 4.15 Tečná složka elektrického pole podél vedení

Integrací tohoto průběhu, opět přímo v prostředí programu Maxwell, se získá výsledné napětí mezi uzly, které v tomto konkrétním případě činí 2107,5 V.

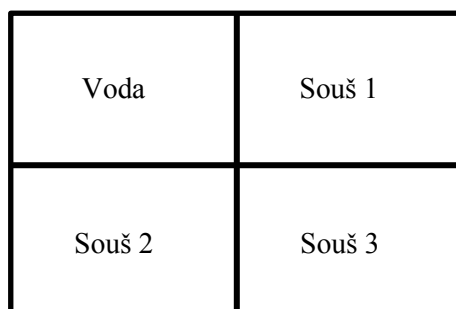
Model byl tedy upraven, aby lépe odpovídal skutečnosti, ale má však stále jisté nedostatky. Například je už tak velký, že by mohlo roli hrát a zakulacení Země, případně i terén, jako jsou například hory. Dalším aspektem je i samotný electrojet. Ten již sice v tomto modelu má reálné rozměry či velikost, ale například v [8] nebo [16] upozorňují na to, že často používané znázornění electrojetu jakožto proudu tekoucího jen na západ nebo východ (obr. 4.16a) není zcela správný. Změřené průběhy totiž dokazují, že v mnoha případech tečou proudy v rámci electrojetu neuspořádaně i mezi severem a jihem (obr. 4.16b). Zároveň však dodávají, že simulace takových náhodných jevů je značně náročná.



Obr. 4.16 Idealizovaný (a) a skutečný (b) electrojet [8]

4.3 Nehomogenity podloží

Jedním z dalších zajímavých úkazů je hranice, kde se náhle mění podloží nebo oblast u pobřeží moří či velkých vodních ploch. Z důvodů rozdílných vodivostí se na těchto hranicích akumulují náboje, které zvyšují intenzitu elektrického pole na straně s menší vodivostí a snižují ji na straně opačné, aby byla zajištěna kontinuita proudu. Z tohoto důvodu mohou být sítě u pobřeží namáhány více a to dle [16] do vzdálenosti desítek až stovek kilometrů od pobřeží.



Obr. 4.17 Rozdělení povrchu

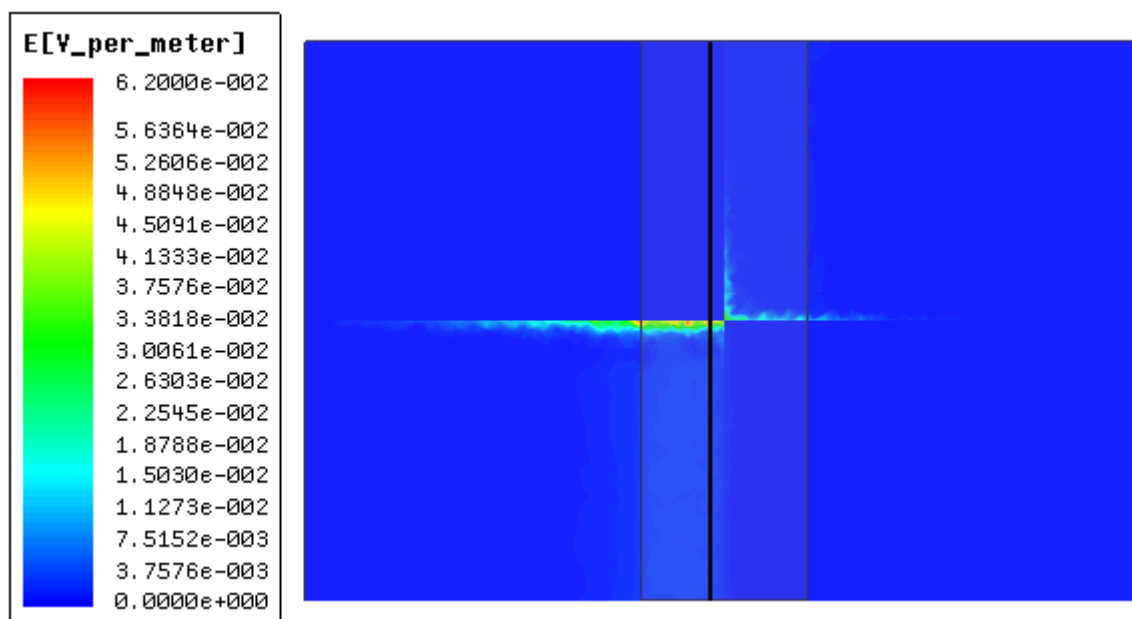
Na obr. 4.17 je znázorněno rozdělení modelu na čtyři části s rozdílným složením vodivostních vrstev. Vlastnosti vrstev jednotlivých částí jsou popsány v tab. 4.2 a vychází se přitom z označení na obr. 4.9.

Výsledek je k vidění na obr. 4.18. Lze vidět, že na hranicích mezi oblastmi s odlišně vodivými vrstvami dochází k velkým změnám elektrického pole.

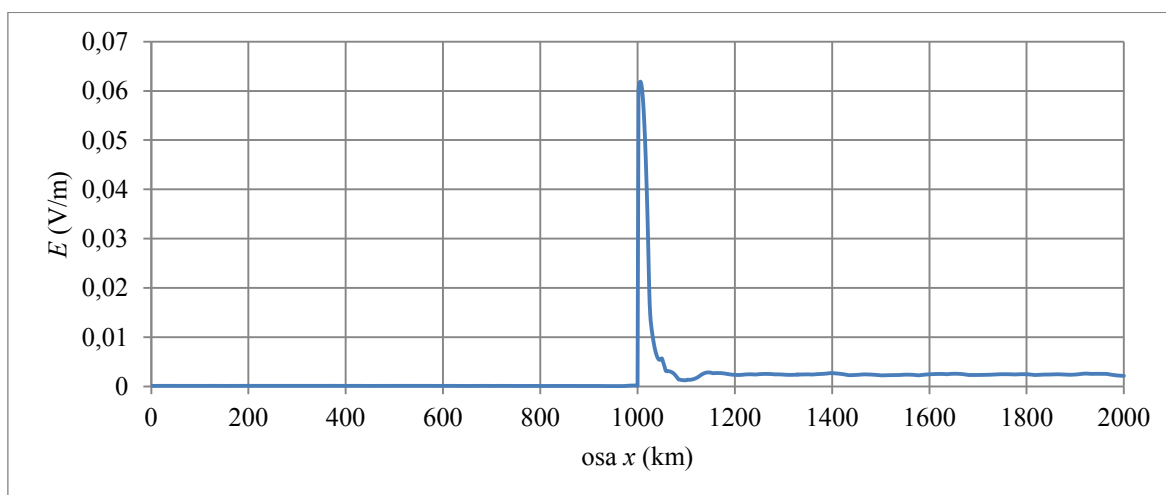
Tab. 4.2 Vodivé vrstvy [28], [31]

	Voda		Souš 1		Souš 2		Souš 3	
Vrstva	Vodivost σ_i ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)	Tloušťka vrstvy d_i (km)	Vodivost σ_i ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)	Tloušťka vrstvy d_i (km)	Vodivost σ_i ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)	Tloušťka vrstvy d_i (km)	Vodivost σ_i ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)	Tloušťka vrstvy d_i (km)
1	3,2	4	0,01	15	0,0006	20	1	2
2	0,001	6	1	10	0,002	20	0,05	10
3	0,0001	50	0,001	120	0,00125	110	2	1
4	0,02	> 50	0,1	> 120	0,1	> 110	0,001	100
5							0,1	> 100

Graf na obr. 4.19 pak jasně ukazuje, jak k prudkému nárůstu elektrického pole, na zlomu mezi velmi málo vodivou pevninou a dobře vodivým mořem, dochází. Zároveň se potvrzuje tvrzení z [16], že takto zesílené pole zasahuje až desítky kilometrů do vnitrozemí.



Obr. 4.18 Elektrické pole na hranicích různých podkladů



Obr. 4.19 Průběh elektrické pole na hranici voda - souš

5. MODELOVÁNÍ V EMTP-ATP

Tato kapitola se zabývá simulováním vlivu geomagneticky indukovaných proudů na přenosovou soustavu. K tomuto účelu je použit software EMTP-ATP (ElectroMagnetic Transients Program – Alternate Transients Program). Jedná se o software simulující přechodné elektromagnetické a elektromechanické jevy v elektrických sítích, který je vyvíjený již od roku 1984.

Pro znázornění vlivu GIC na soustavu je simulovaná jen malá část, konkrétně generátor, dva transformátory a zátěž.

5.1 Transformátory

U transformátorů pro simulaci geomagneticky indukovaných proudů nestačí, aby byly použity transformátory ideální. Naopak pracují transformátory v těchto případech v nestandardních podmínkách a je tak nutné použít prvek s co nejpřesnějším matematickým modelem magnetického jádra.

Nabízí se tak v podstatě čtyři možnosti:

- Navrhnout model ze základních prvků
- Saturační transformátor
- BCTRAN
- Hybridní model

U první možnosti však nestačí pouhý zjednodušený model, jako tomu bylo v kapitole 3.1 na obr. 3.4, ale je potřeba sestavit komplexní model z lineárních a nelineárních základních prvků, který by respektoval i typ jádra a spojení vinutí. Toto řešení by ale bylo časově velmi náročné a možná by ani nedosáhlo kvalit již hotového prvku.

EMTP-ATP nabízí ve své knihovně prvků i jednofázový a trojfázový saturační transformátor, který umožňuje nastavení magnetizační křivky jádra. Ale ve svém základu se jedná vlastně pouze o model jako na obr. 3.4 a jeho rozšířenou trojfázovou variantu.

BCTRAN není špatná volba. Jeho velkou výhodou je, že stačí znát pouze hodnoty z měření transformátoru naprázdno a nakrátko. Z těchto údajů dokáže BCTRAN odvodit všechny potřebné parametry, včetně nelineární magnetizační charakteristiky – v případě znalosti hodnot alespoň u tří různých napětí při měření naprázdno. Takto vytvořena magnetizační křivka není příliš přesná, protože se jedná jen o lineární interpolaci zadaných údajů z měření naprázdno. Magnetizační charakteristika se tak obzvláště v oblasti nad kolenem může se skutečností hodně rozcházet. Při znalosti skutečné magnetizační charakteristiky však lze tento nedostatek odstranit použitím externího modelu magnetického jádra pomocí nelineárních prvků, jako tomu je v [32] nebo [33]. Ale takto se opět zanedbá vliv různých typů jádra.

Poslední možností je použití Hybridního transformátoru (Hybrid Transformer) z knihovny programu. Jedná se o nejnovější a nejkompaktnější model transformátoru, jaký EMTP-ATP nabízí. Je založen na převedení magnetického obvodu transformátoru na duální obvod elektrický. Dokáže simulovat různé jádrové i plášťové typy transformátorů a jejich magnetické toky a ztráty v jednotlivých částech magnetického obvodu, rozptylový magnetický tok, odpor vinutí, a to i frekvenčně závislý, a kapacity mezi fázemi i mezi zemí. Potřebné parametry si tento prvek vypočítá ze zadaných hodnot, které lze zadat třemi způsoby:

- Konstrukční parametry – zadají se údaje o přesných rozměrech vinutí, jádra, nádrže, jejich materiál apod.
- Měření – podobně jako u BCTRAN stačí zadat výsledky z měření nakrátko, naprázdno a navíc poměrné rozměry jádra
- Typické hodnoty – parametry se na základě zadaných výkonů a napětí odvodí od podobných transformátorů

Hybridní model je tak přesnější než BCTRAN a to včetně magnetizační charakteristiky, která již není tvořena pouhou lineární interpolací, ale je tvořena Frolichovou rovnicí, která zajišťuje věrnější tvar křivky i v nasycené oblasti magnetizační charakteristiky. [34]

Pro simulaci geomagneticky indukovaných proudů na přenosovou soustavu v této diplomové práci tak byl zvolen Hybridní transformátor, který nabízí poměrně přesný matematický model transformátoru a zároveň i snadnou obsluhu.

Transformátor 1000 MV·A

Protože zjistit přesné informace o rozměrech a materiálech vinutí, jádra apod. není jednoduché a sestavit parametry transformátoru podle typických hodnot není příliš přesné, vychází se v tomto případě z naměřených hodnot transformátoru z [32].

Jedná se o systémový trojfázový trojvinutový autotransformátor 400/275/13 kV o jmenovitém výkonu 1000 MV·A v zapojení YNa0d11 v jádrovém provedení s 5 sloupky.

Tab. 5.1 Měření naprázdno transformátoru 1000 MV·A [32]

U_0 (kV)	$u_{0\%}$ (%)	I_0 (A) @ 60 MV·A	$i_{0\%}$ (%) @ 1000 MV·A	ΔP_0 (kW)
11,7	90	6,18	0,0125	96,3
13	100	13,15	0,0296	127,9
14,3	110	55,43	0,137	175,3

Měření bylo prováděno na terciálním vinutí o jmenovitém výkonu 60 MV·A. V Hybridním transformátoru v EMTP-ATP je ale nutné zadat proud v procentech a s přepočtem na primární stranu.

Příklad výpočtu pro první řádek [32]:

$$I_{0\%} = I_0 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U_0}{S} \cdot 100 = 6,18 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 11,7 \cdot 10^3}{1000 \cdot 10^6} \cdot 100 = 0,0125 \% \quad (5.1)$$

Tab. 5.2 Měření nakrátko transformátoru 1000 MV·A [32]

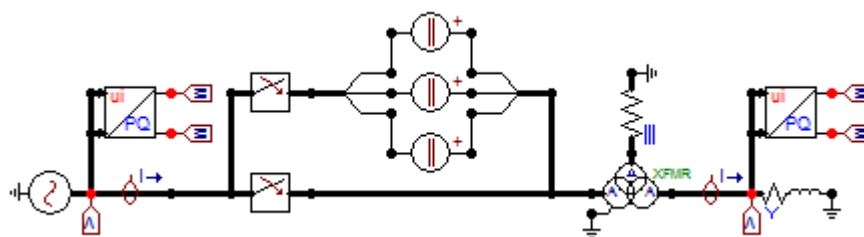
	U_k (V)	z_k (%)	I_k (A)	ΔP_k (kW)	S (MV·A)
P/S	67127	16,78	1444	1383	1000
P/T	29141	7,29	86,6	71,9	60
S/T	16407	5,97	126	77,3	60

Do Hybridního transformátoru jsou zadány údaje o výkonech, napětích, zapojení, hodinovém úhlu a typu jádra. Je potřeba zvolit i pořadí, v jakém jsou jednotlivá vinutí na jádro navinuta.

Pro určení magnetických vlastností jádra nabízí tento prvek několik dalších možností. Pro nejpresnější magnetizační křivku je zvolena alternativní Frolichova rovnice s maximálním počtem bodů křivky, tedy 9. Je nastaven pseudo-nelineární typ nelinearity. Protože se transformátor pohybuje při průchodu GIC v přesycené oblasti, je důležitá i vzduchová indukčnost. Ta není známa, ale Hybridní transformátor ji dokáže na základě zadaných údajů přibližně určit. [34]

Znamé nebyly ani relativní rozměry jádra transformátoru. Ale po korespondenci s autorkou práce [32] byly zjištěny. V Hybridním transformátoru jsou tak zadány i tyto informace. Konkrétně relativní průřez a délka spojky a vnějšího sloupku má hodnotu 0,6; 1,84 respektive 0,6; 2,81.

Na obr. 5.1 je schéma obvodu, kterým jsou testovány vlastnosti tohoto transformátoru při průchodu stejnosměrného proudu.

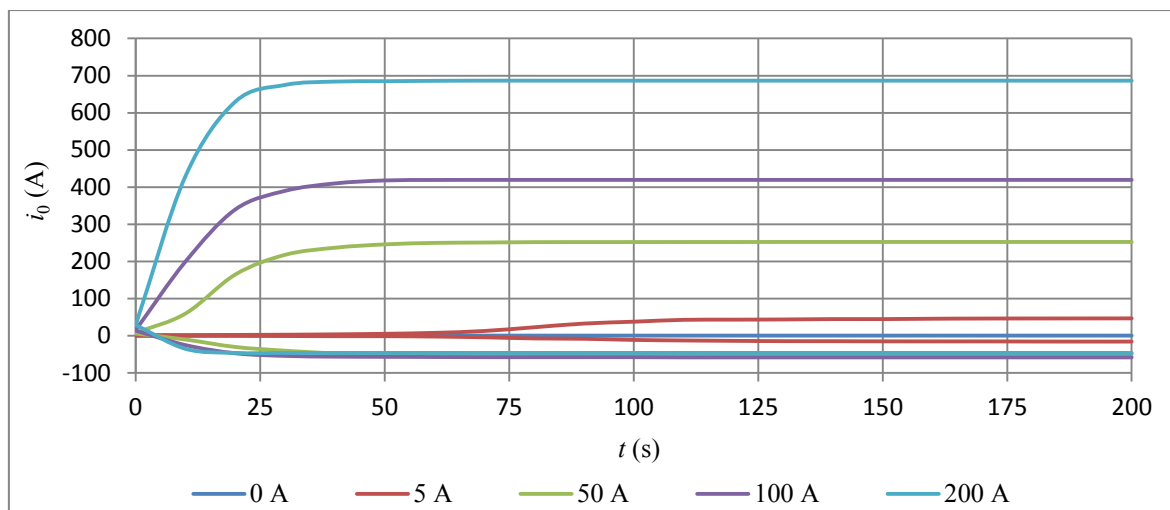


Obr. 5.1 Transformátor 1000 MV·A v EMTP-ATP

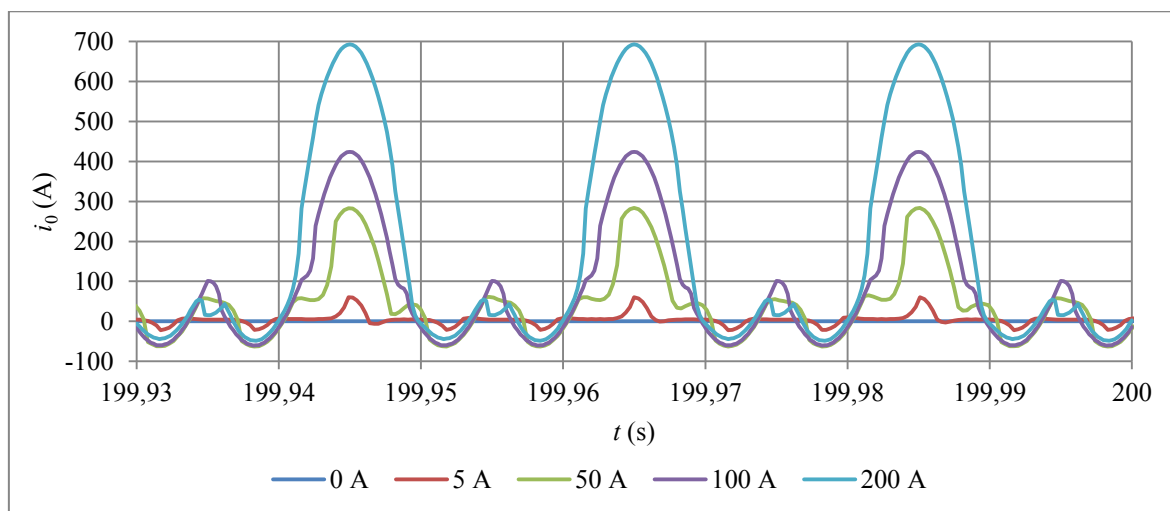
Na primární straně je připojen ideální trojfázový napěťový zdroj 400 kV a do série s ním a jsou připojeny stejnosměrné zdroje, představující geoelektrické pole. Do série z toho důvodu, že se jedná o autotransformátor, který nemá galvanicky odděleny primární a sekundární vinutí a v případě připojení do uzlu by se stejnosměrný proud uzavíral přes obě strany. Do série s vedením by se zdroj měl zapojit i při počítání větších celků s uvažováním nehomogenního elektrického pole, jinak může dojít k velkým chybám, jak je doloženo v [25]. Terciální vinutí je uzemněno přes odpory 1 MΩ z důvodu zamezení vzniku plovoucího potenciálu. Déle jsou měřeny proudy, napětí a výkony pomocí interních sond a MODELS prvků. Podle potřeb měření se nastaví velikost napětí

stejnosměrných zdrojů nebo zátěže, popř. se úplně odpojí. Čas sepnutí stejnosměrných zdrojů je řízen přepínači.

Při měření vlivu GIC na transformátor naprázdno byla zátěž odpojena a měřilo se při různých hodnotách stejnosměrného proudu. 1 V na stejnosměrných zdrojích odpovídá přibližně 2 A na fázi.



Obr. 5.2 Obálky proudů naprázdno při různých velikostech GIC

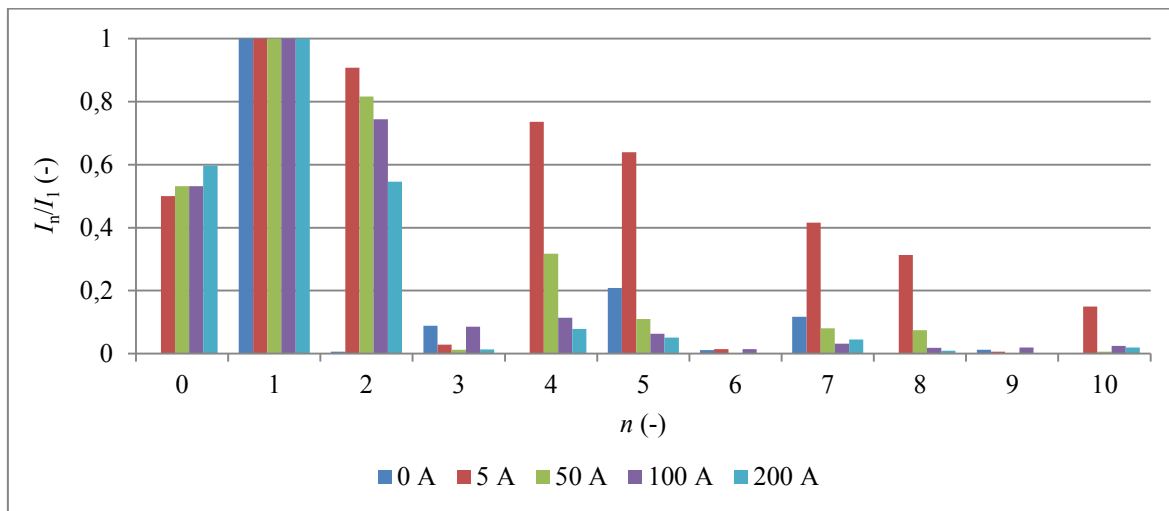


Obr. 5.3 Proud naprázdno při různých velikostech GIC

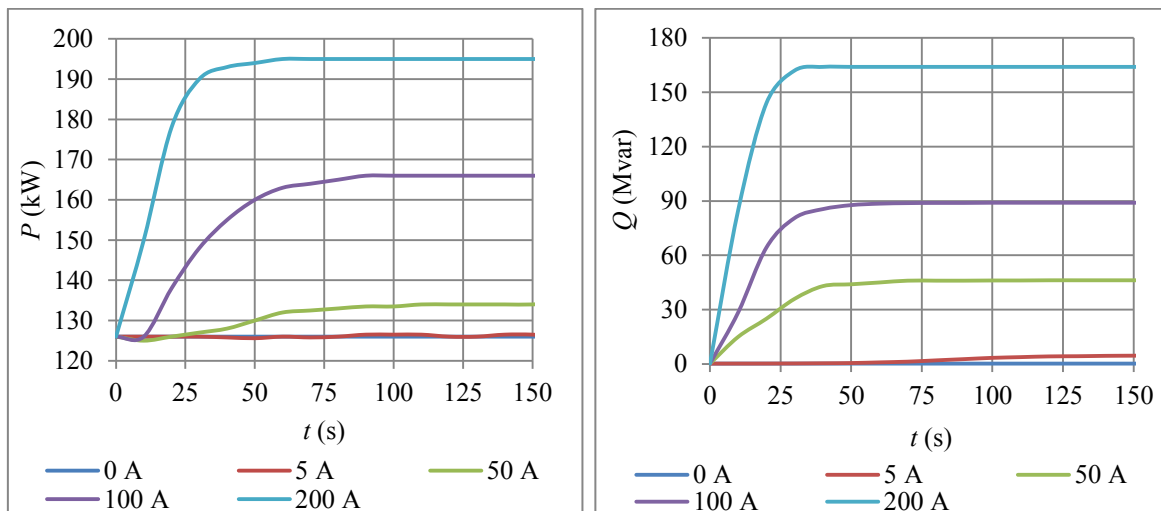
Z grafů výše, na kterých jsou průběhy proudů jedné fáze, je vidět, že velikost magnetizačního proudu při průchodu geomagneticky indukovaných proudů transformátorem je přímo závislá na velikosti protékajícího stejnosměrného proudu. Naopak doba, za kterou dojde k přesycení magnetického jádra, se s velikostí GIC zkracuje. Zároveň je zřejmé, že stačí i relativně malý proud 5 A, aby k přesycení došlo.

Lze si také všimnout, že průběhy proudů opravdu nejsou jen prosté špičky jako na zjednodušeném modelu na obr. 3.5b, ale díky složitější konstrukci trojfázového transformátoru přibýly v průbězích další, podstatně menší, špičky i s rozdílnou polaritou. Harmonická analýza těchto průběhů proudů

na obr. 5.4 ukazuje, jak se mění rozložení harmonických v odebíraném proudu při různých velikostech stejnosměrného proudu. Z tohoto grafu vyplývá, že v průbězích vznikla hlavně druhá harmonická, ale výrazný podíl má i čtvrtá nebo pátá. Naopak odebíraný proud téměř neobsahuje harmonickou třetí a její násobky, což je způsobeno zapojením terciálního vinutí do trojúhelníku. Při celkovém pohledu na tyto průběhy harmonických se dá říct, že s vyšším stejnosměrným proudem klesá výskyt harmonických vyšších řádů a stává se dominantní pouze první a druhá.



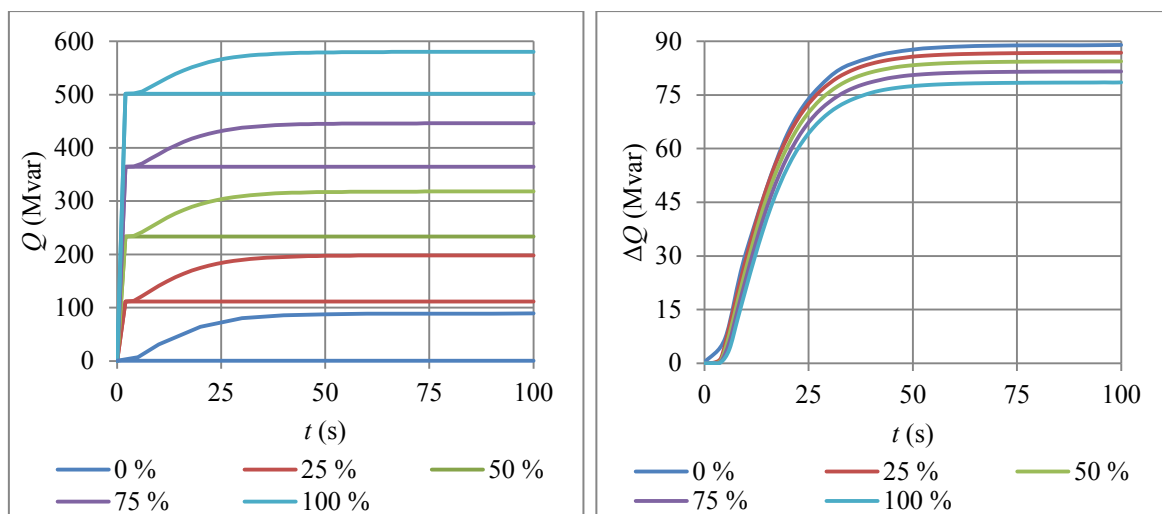
Obr. 5.4 Harmonická analýza proudů při různých velikostech GIC



Obr. 5.5 Odebíraný činný a jalový výkon při různých velikostech GIC

S výrazným nárůstem magnetizačních proudů přímo souvisí i výrazný nárůst odebíraného jalového výkonu, který je znázorněn na obr. 5.5. Při velikosti GIC 200 A, tak činí tento nárůst téměř 170 Mvar, což je téměř 17 % jmenovitého zdánlivého výkonu transformátoru. Navíc tento graf znázorňuje efektivní hodnoty jalového výkonu. Z průběhů proudů je však jasné, že odebíraný výkon není kontinuální, ale k nárůstům dochází jen v krátkých intervalech. Zároveň s tím vzrůstají i činné ztráty.

Při měření vlivu zatížení transformátoru na jeho chování při průchodu geomagneticky indukovaných proudů byla použita hodnota stejnosměrného proudu 100 A na fázi a měnilo se zatížení od stavu naprázdno po jmenovité s účínkem 0,9 a s krokem 25 %.



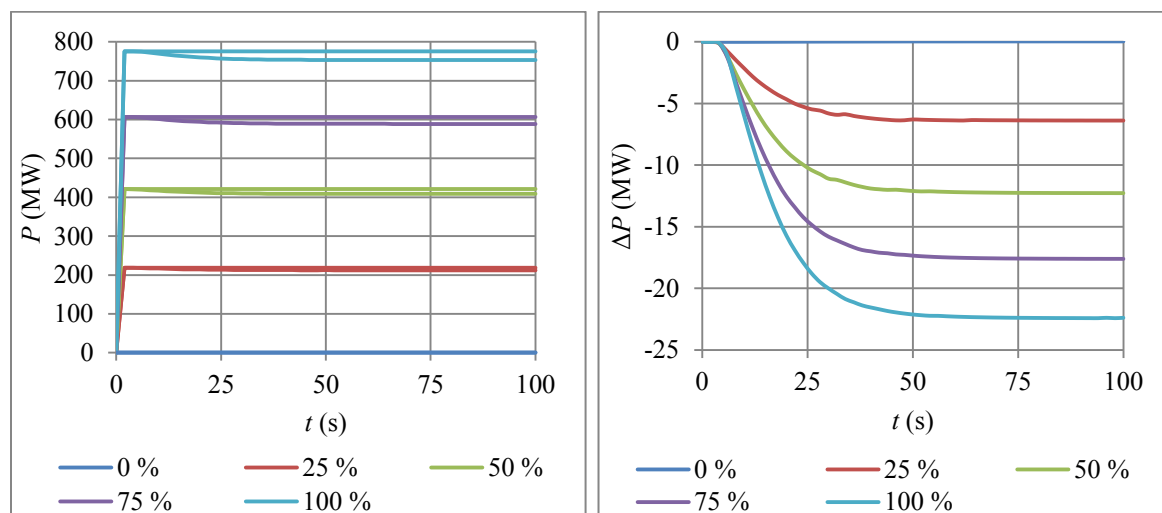
a) Jalové výkony s a bez působení GIC

b) Změna jal. výkonů vlivem GIC

Obr. 5.6 Změna jalových výkonů při různém zatížení

Z grafů na obr. 5.6 je vidět, že při různém zatížení dochází i k rozdílné změně odebíraného výkonu. Zvýšení odběru jalového výkonu způsobené magnetizačním proudem v přesyceném stavu je při jmenovitém zatížení menší než při stavu naprázdno a to až o více než 10 Mvar. Se zmenšujícím se zatížením klesá i tento rozdíl.

Zároveň s tím poklesl i odebíraný činný výkon. V případě jmenovitého zatížení o 22,4 MW a, podobně jako u jalového výkonu, i zde se tento rozdíl snižuje s menším zatížením.

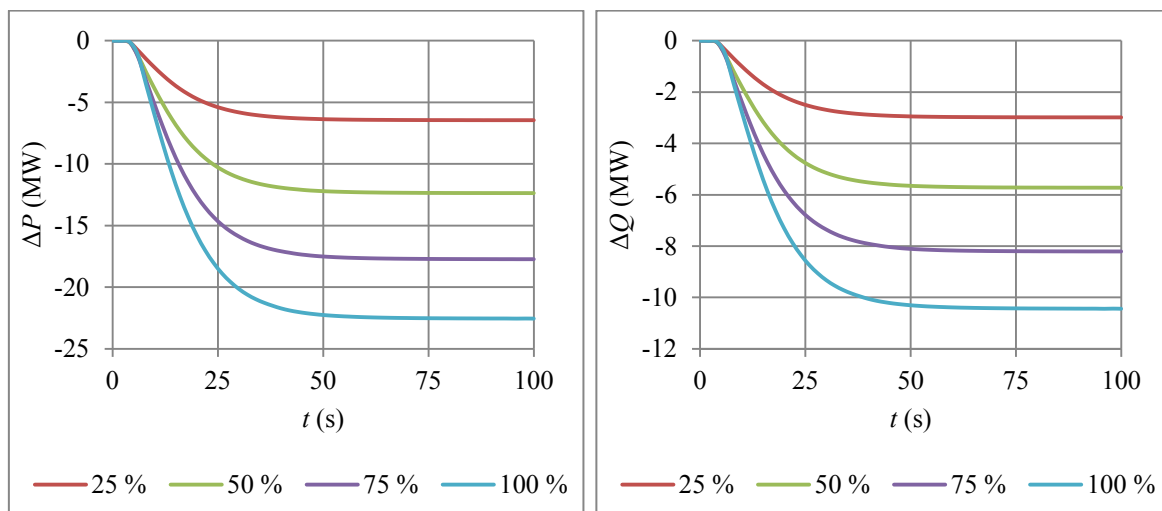


a) Činné výkony s a bez působení GIC

b) Změna činných výkonů vlivem GIC

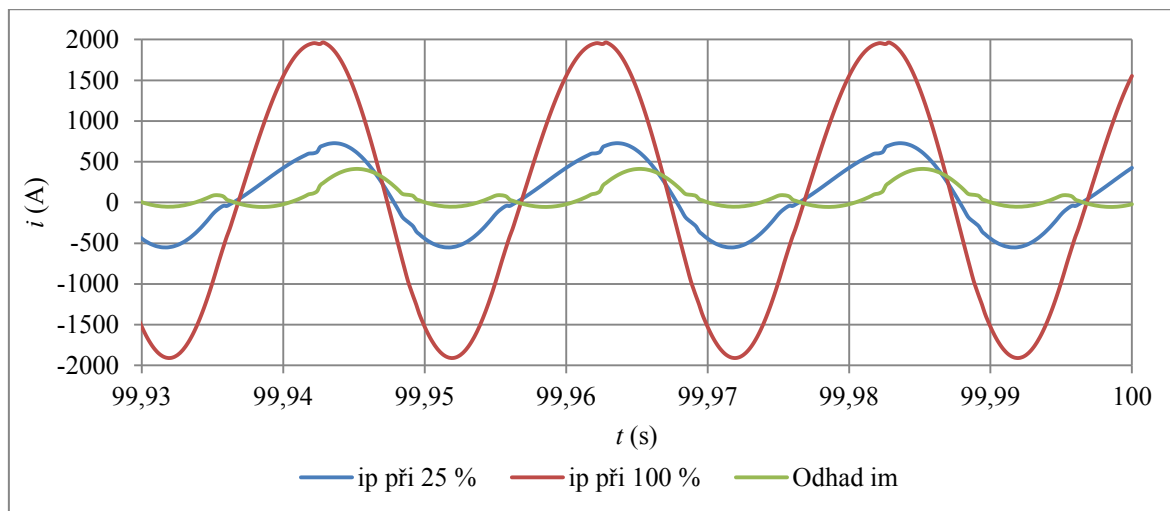
Obr. 5.7 Změna činných výkonů při různém zatížení

Tyto rozdíly ve výkonech však přesně odpovídají změnám zatížení na sekundární straně transformátoru na obr. 5.8, které jsou způsobeny mírným poklesem napětí. Pokud by byly tyto výkony konstantní nebo došlo k regulaci napětí, nic by se nezměnilo. Dá se tak říct, že zatížení nemá na chování transformátoru při průchodu GIC téměř žádný vliv.



Obr. 5.8 Změny výkonů vlivem GIC na sekundární straně transformátoru

Hybridní transformátor je v podstatě black box a neumožňuje tak přímo změřit magnetizační proud. Ten je tak pro tento případ jen odhadnut z rozdílu proudu z obvodu s GIC a bez GIC. Výsledek však odpovídá proudu z obr. 5.3. Tento proud je superponován na proud zátěže a podle jeho velikosti také ovlivní celkový tvar. Při jmenovitém zatížení je tak na primární straně transformátoru na první pohled jen sinusovka, ale při zatížení transformátoru 25 %, je již zřetelně viditelná deformace.



Obr. 5.9 Proudů na primární straně transformátoru při zatížení

Transformátor 345 MV·A

Druhým transformátorem je blokový trojfázový dvouvinutový transformátor 19/400 kV o jmenovitém výkonu 345 MV·A v zapojení YNd1 v jádrovém provedení s 5 sloupky. Údaje sloužící k určení parametrů, stejně jako v předchozím případě, jsou měření naprázdno a nakrátko z [33].

Tab. 5.3 Měření naprázdno transformátoru 345 MV·A [33]

U_0 (kV)	u_0 (%)	I_0 (A)	i_0 (%)	ΔP_0 (kW)
17,1	90	5,14	0,049	126,2
19	100	10,8	0,103	174,1
14,3	110	36,69	0,350	239,9

Tab. 5.4 Měření nakrátko transformátoru 345 MV·A [33]

	U_k (V)	z_k (%)	I_k (A)	ΔP_k (kW)	S (MV·A)
P/S	71200	17,8	498	838,4	345

Opět nejsou známy hodnoty kapacit a v tomto případě ani rozměry jádra. Zůstalo proto výchozí nastavení prvku. Ostatní nastavení je stejné, jako u předchozího modelu.

5.2 Vedení

EMTP-ATP umožňuje simulovat vedení několika různými prvky se soustředěnými parametry, rozprostřenými konstantními parametry a s rozprostřenými frekvenčně závislými parametry. Vzhledem k výskytu kvazi-stejnosměrného proudu i vyšších harmonických je použit poslední zmíněný prvek, konkrétně JMarti.

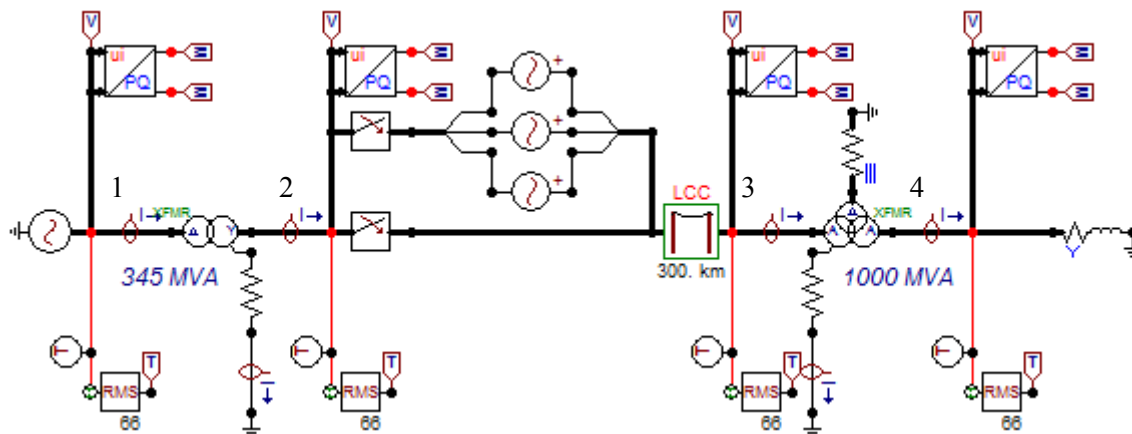
Frekvenční závislost je počítána od 0,001 Hz do 2 kHz, délka vedení je 300 km, tedy stejná jako při výpočtu napětí v Maxwellu v kapitole 4.2.1, je nastaveno počítání skin efektu a je zvolena i transpozice vedení. Jedná se o portálový stožár s parametry v tab. 5.5. Ostatní parametry jsou spočítány interně v EMTP-ATP.

Tab. 5.5 Parametry vedení [35], [36]

Fáze	Poloměr vodiče (cm)	Odpor vodiče ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	Horizontální vzdálenost (m)	Vertikální vzdálenost (m)	Vzdálenost vodičů ve svazku (cm)	Počet vodičů ve svazku (-)
1	1,325	0,0849	-11	22	40	3
2	1,325	0,0849	0	22	40	3
3	1,325	0,0849	11	22	40	3
0	0,525	1,31	-5,5	30	-	1
0	0,525	1,31	5,5	30	-	1

5.3 Část sítě

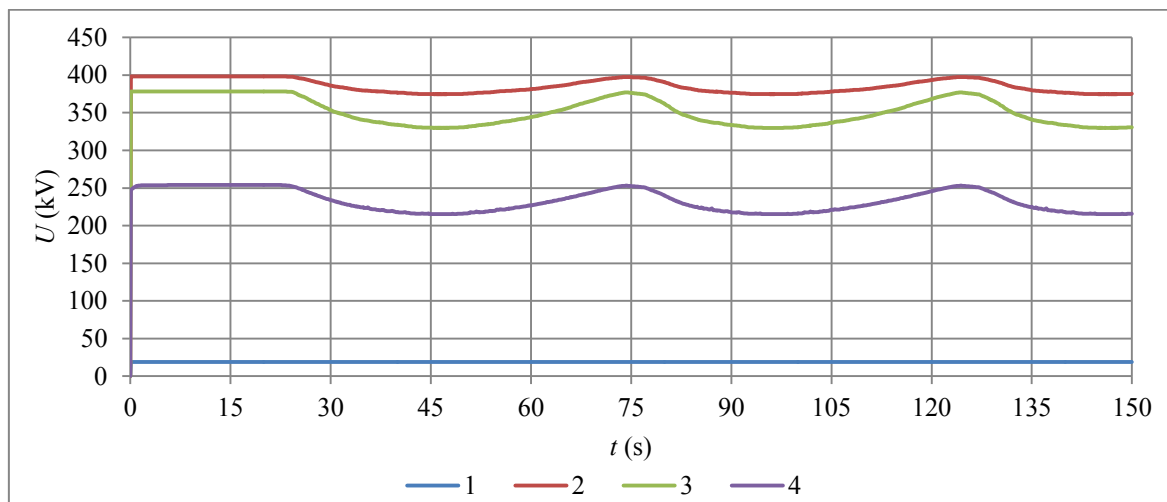
Jak již bylo uvedeno v úvodu této kapitoly, pro simulování vlivu geomagneticky indukovaných proudů na přenosovou soustavu je zvolena pouze malá část soustavy. Zdroj, blokový transformátor, vedení, systémový transformátor a zátěž.



Obr. 5.10 Schéma sítě v EMTP-ATP

Jako zdroj je připojen ideální trojfázový zdroj s napětím 19 kV, který je připojen k transformátoru 400/19 kV o výkonu 345 MV·A s uzemněným uzlem s odporem 0,2 Ω . Do série s vedením jsou připojeny střídavé zdroje s frekvencí 0,01 Hz a napětím 2107,5 V, což jsou hodnoty, které odpovídají hodnotám v Maxwellu v kapitole 4.2.1. K vedení je připojen jeden autotransformátor 400/275 kV s výkonem 1000 MV·A a uzemněným uzlem rovněž s odporem 0,2 Ω a na jeho sekundární straně je připojena zátěž 315 MV·A s účínkem 0,9.

315 MV·A by to bylo, pokud by se uvažovalo jmenovité napětí sekundární strany transformátoru 275 kV. Ale protože není tento obvod nijak regulován, jsou mezi zdrojem a tímto zatížením značné ztráty a úbytky napětí, odebíraný výkon na sekundární straně proto v ustáleném stavu není 315 MV·A, ale jen necelých 270 MV·A.

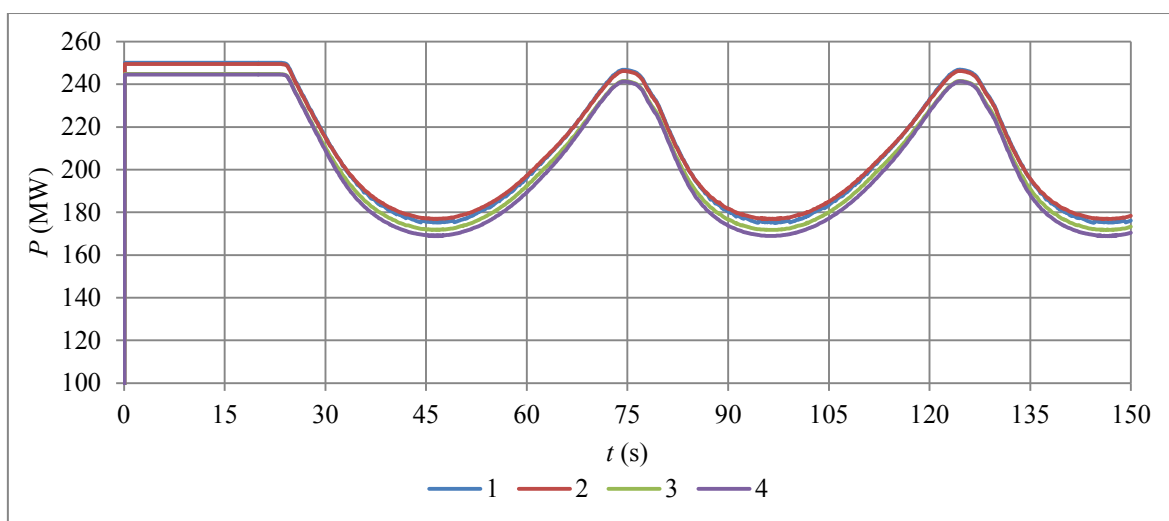


Obr. 5.11 Efektivní hodnoty napětí v různých místech soustavy

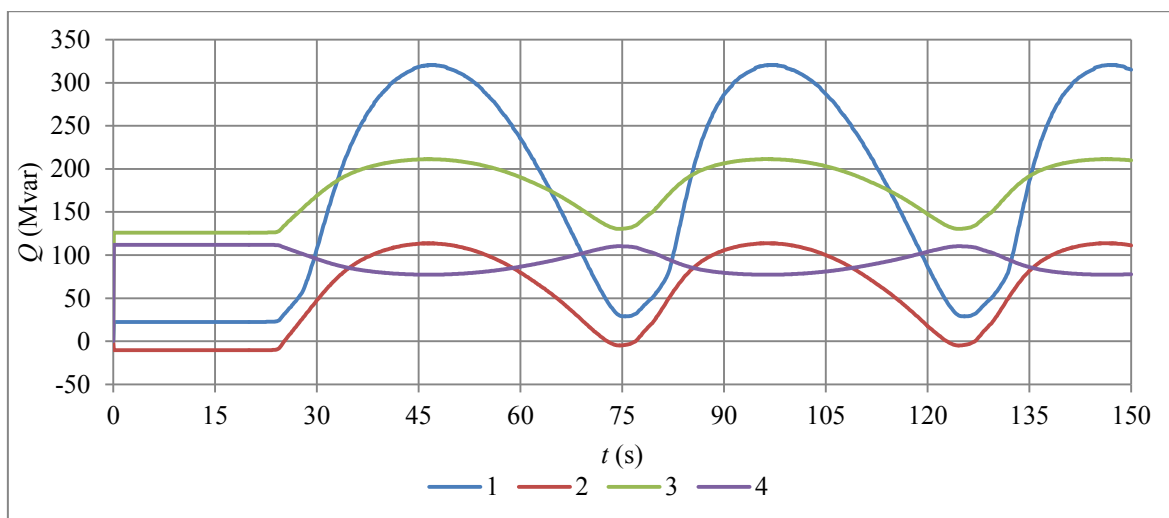
Na předešlém grafu lze vidět, k jakým úbytkům napětí dochází. Na sekundární straně 1000 MV·A transformátoru tak v ustáleném stavu není napětí 275 kV, ale jen 254 kV, čemuž odpovídá i snížený odebíraný výkon.

V čase 20 s se zapnou střídavé napěťové zdroje představující geomagnetickou bouři. Vedením začne protékat kvazi-stejnosměrný proud daný odporem vedení, odporem vinutí transformátoru a zemnicím odporem uzlů transformátorů, který v tomto případě činí 197 A na fázi. Uzly transformátorů tak teče proud o velikosti 591 A.

Dochází k nasycování transformátorů. Zvyšuje se odběr jalového výkonu, což má za následek další pokles napětí na sekundární straně systémového transformátoru o 42 kV a tím i další snížení odebíraného výkonu zátěží na 187 MV·A. Toto snížení odebíraného výkonu mírně kompenzuje zvýšený odběr jalového výkonu samotného transformátoru a celkový nárůst z pohledu primární strany je tak o něco menší. Pokles odebíraného jalového výkonu mezi body 2 a 3 je způsoben malým zatížením vedení. O pár vteřin později dochází k nasycení blokového transformátoru.



Obr. 5.12 Činné výkony v různých místech soustavy

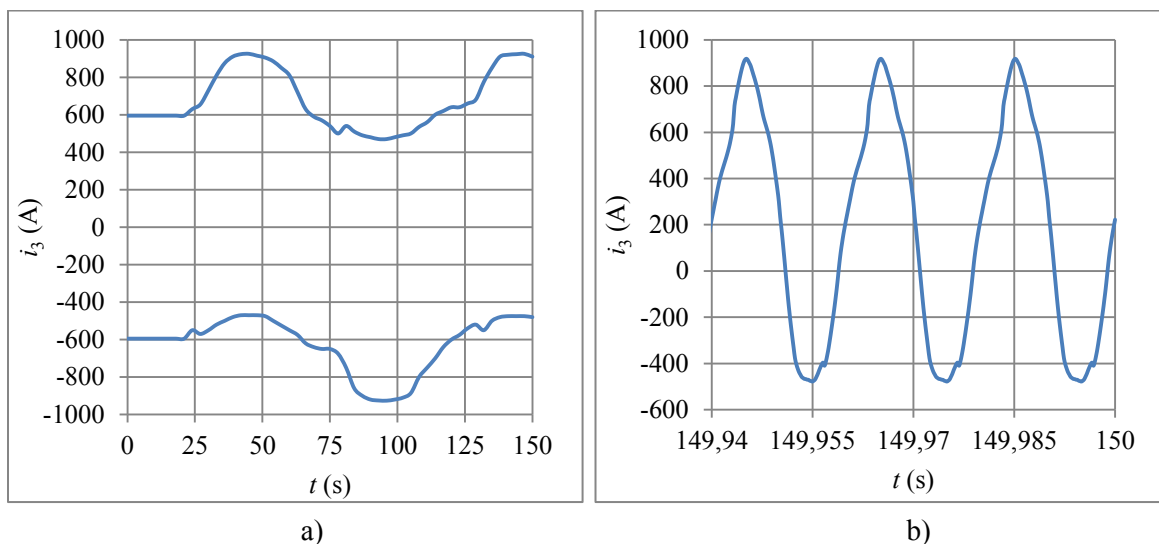


Obr. 5.13 Jalové výkony v různých místech soustavy

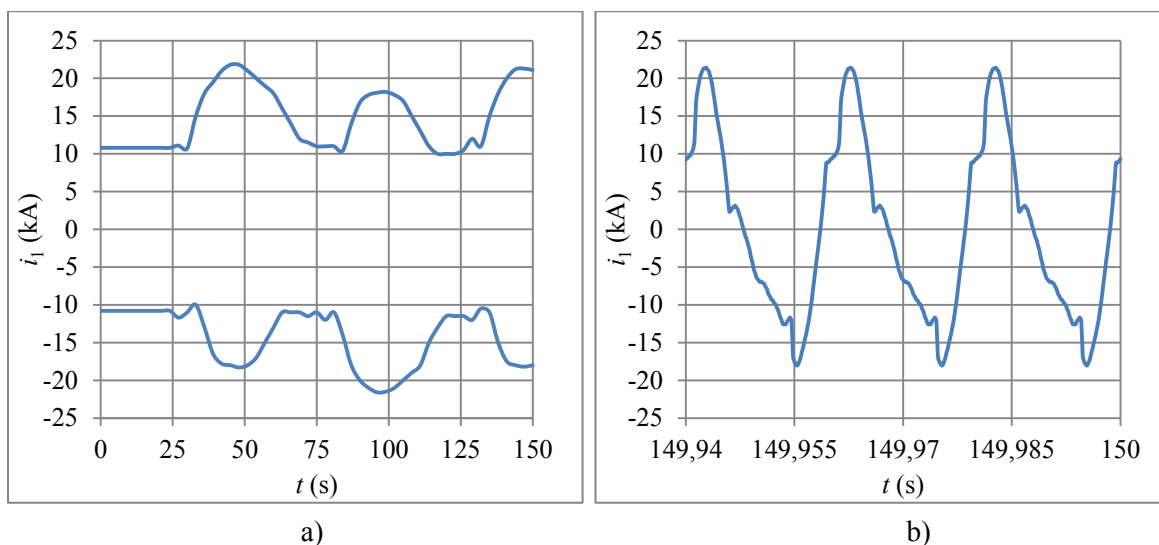
Z pohledu zdroje tak došlo vlivem protékajícího geomagneticky indukovaného proudu ke snížení činného výkonu o 70 MW a ke zvýšení jalového výkonu o 296 Mvar.

Co se průběhů proudů týče, na sekundární straně dochází k mírné změně tvaru proudu, který obsahuje navíc druhou a čtvrtou harmonickou. U proudu na primární straně v místě 3 na obr. 5.14 však jde vidět stejnosměrné posunutí a při detailním pohledu jde vidět i výrazná deformace sinusového průběhu. Harmonická analýza na obr. 5.16a vykazuje opět nárůst druhé a čtvrté harmonické složky.

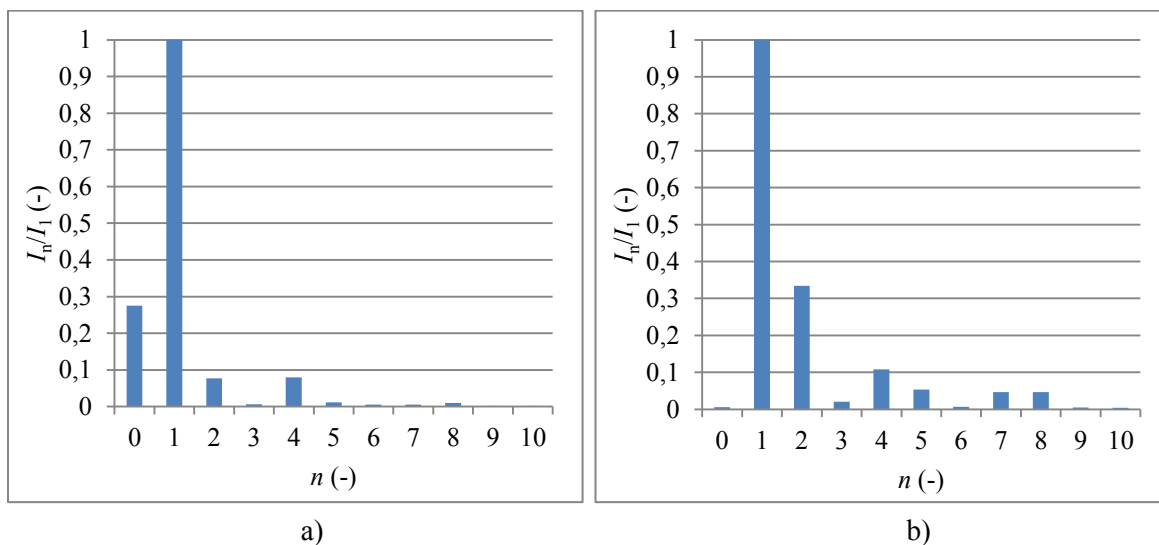
Dramatičtější situace je u proudu tekoucího od napájecího zdroje. U něj lze na obr. 5.15 pozorovat znatelný nárůst amplitudy o 10 kA. Bližší pohled ukazuje velmi výraznou deformaci sinusového průběhu, vlivem magnetizačních proudů. Harmonická analýza tohoto průběhu na obr. 5.16b ukazuje existenci hlavně druhé, čtvrté a páté harmonické složky. Díky zapojení do trojúhelníku neobsahuje stejnosměrnou složku, třetí harmonickou a její násobky.



Obr. 5.14 Obálka (a) a přibližný průběh (b) proudu mezi transformátory v místě 3

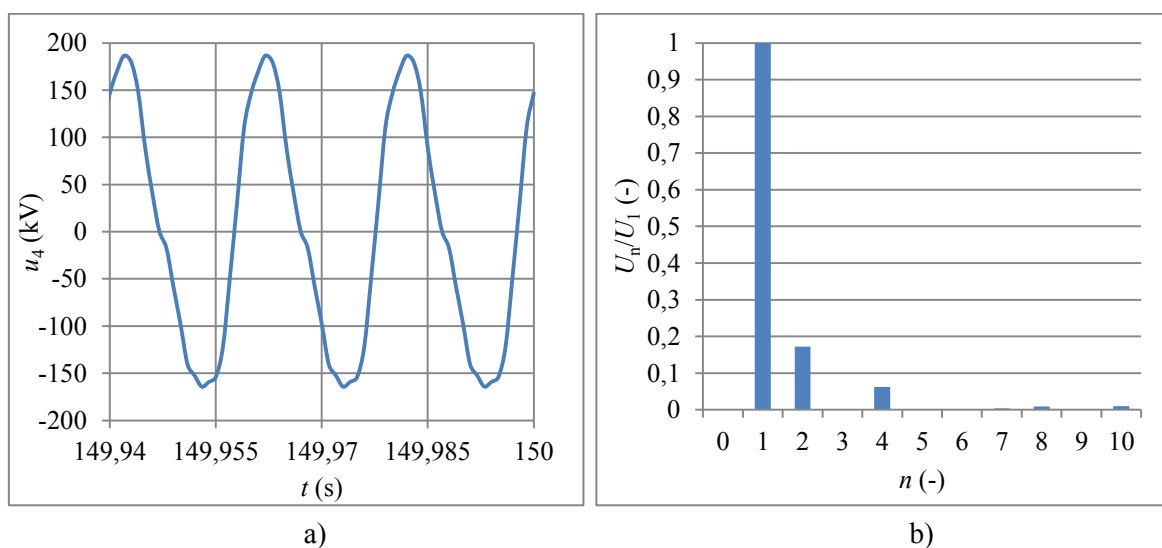


Obr. 5.15 Obálka (a) a přibližný průběh (b) proudu z napájecího zdroje v místě 1



Obr. 5.16 Harmonická analýza proudů v místě 3 (a) a v místě 1 (b)

Impulzní charakter magnetizačních proudů ovlivňuje i tvar napětí a i v něm se objevují harmonické druhého a čtvrtého řádu. Tvary napětí na sekundární a na primární straně systémového transformátoru se od sebe, kromě amplitudy, téměř neliší. Napětí na primární straně blokového transformátoru je čistá sinusovka, protože je použit ideální napěťový zdroj.



Obr. 5.17 Průběh (a) a harm. analýza napětí v místě 4 (b)

6. MOŽNOSTI MODELOVÁNÍ

Stále se jedná o poměrně mladou problematiku, která se do popředí širšího zájmu dostala až po problémech v Quebecu v roce 1989. Jsou však vymyšleny postupy pro teoretické i numerické výpočty a dá se očekávat, že v budoucnu bude modelování hrát čím dál větší roli.

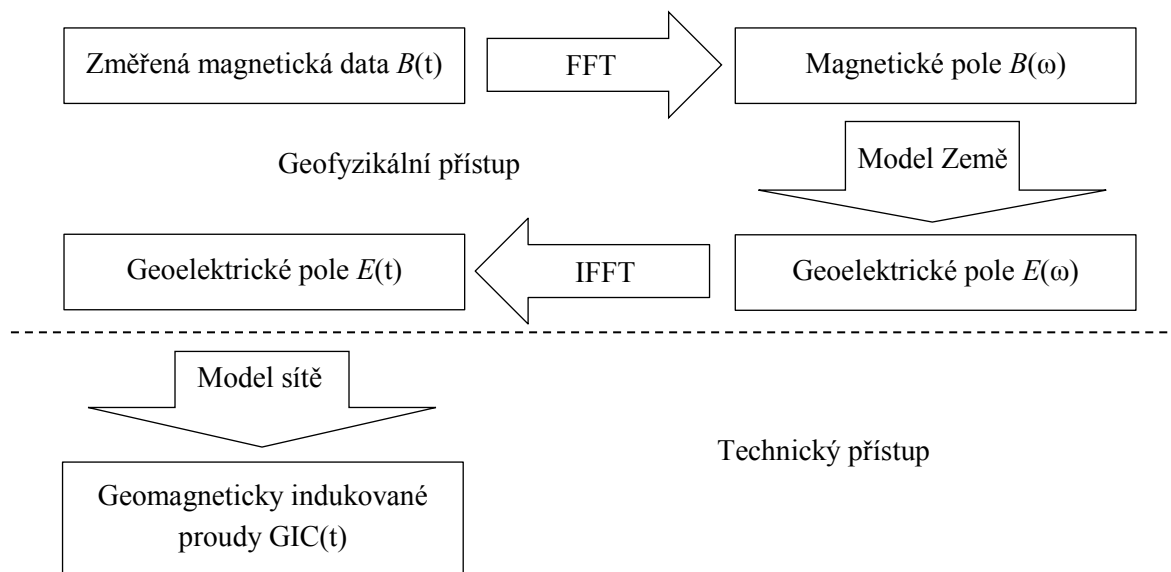
Jak bylo uvedeno v kapitole 4.2.1, geomagnetická bouře ovlivňuje jen zemský povrch a přímý vliv při interakci s přenosovou soustavou je zanedbatelný, protože proudy v technologických celcích způsobené těmito bouřemi určují až změny geoelektrického pole.

To je z pohledu analytických i numerických výpočtů velice výhodné, neboť lze tuto problematiku rozdělit do dvou samostatných celků, které jsou v [37] pojmenovány jako:

- Geofyzikální přístup
- Technický přístup

Lze se tak věnovat zvlášť určování geoelektrického pole a zvlášť poté jeho aplikaci například při určování vlivu na přenosové soustavy. Naprosto stejně se k tomu ostatně přistoupilo i v rámci této diplomové práce.

Obecně se k výpočtu přistupuje tak, že se záznam průběhu změny magnetického průběhu rozloží Fourierovou transformací na jednotlivé frekvence, provede se výpočet pro každou z nich a výsledné vypočtené geoelektrické pole se převede z frekvenčního spektra zpět do časové závislosti.



Obr. 6.1 Posloupnost výpočtů [37]

6.1 Geofyzikální přístup

Bylo vymyšleno několik analytických přístupů k výpočtům geoelektrických polí, které jsou založeny na několika zjednodušujících podmínkách.

Pro výpočet se tak používá například jen čárový proud místo realistického rozložení electrojetu v ionosféře nebo je tento proud nahrazen plošnou změnou magnetického pole apod. Při určování geoelektrického pole je dále důležitá znalost rozložení vodivosti v zemi. Ta bývá například zjednodušena na jednorozměrný model s frekvenčně závislou vodivostí – různé frekvence magnetického pole zasahují do různě vodivých vrstev a celková vodivost je tak frekvenčně závislá. Navíc jsou tyto modely homogenní a homogenní bývá i výsledné geoelektrické pole. [8], [27], [23]

Při použití numerických výpočtů pro řešení této problematiky je ovšem situace zcela jiná a výpočet není v podstatě ničím svazován. Nejprve byly prováděny metodou konečných prvků spíše dvojrozměrné výpočty, ale jak dokazuje i tato práce, dnes již není problém provést výpočet i trojrozměrný.

Numerické výpočty přináší oproti výpočtům analytickým spoustu výhod. Tam, kde kvůli přílišné komplikovanosti muselo docházet ke zjednodušování a počítat například jen s plošnými magnetickými změnami nebo čárovými proudy a to navíc jen v případech homogenních vodivostí země, se k těmto postupům v numerickém výpočtu přistupovat nemusí.

Není problém provést výpočty i pro realisticky rozložené electrojety nebo pro případy, kdy se mění zemské podloží a tak i zemská vodivost. Záleží již jen na preferencích, časové náročnosti a dostupném výpočetním výkonu, který se však neustále zvyšuje, jak podrobný může výpočet být. Mohou se započítávat hory, kopce, velké řeky či vodní plochy a provést výpočet s libovolnou přesností.

Na druhou stranu je také nutno uvážit, zda takováto přesnost, vykoupena nutným velkým početním výkonem, má vůbec smysl. Je totiž nutné také vzít na vědomí přesnost vstupních údajů, což je v tomto případě podstatné omezení. Jak již bylo popsáno v teoretické části, jsou známy teorie, které vysvětlují pochody mezi Sluncem a zemským povrchem, ale schopnosti tyto jevy přímo měřit a zkoumat jsou značně omezené. Velikosti proudů v ionosféře jsou tak založeny hlavně na pozemních měřeních magnetického pole, ze kterých se zpětně určují jevy v ionosféře. Získané informace například o velikosti electrojetu, tak nemusí být dostatečně přesné. To stejné platí i u geologických podloží a u vodivých vrstev. Proto i při detailním a přesném numerickém modelu mohou vyjít vlivem poměrně nepřesných vstupních dat nepřesné výsledky.

Software pro řešení polí je tak výborným nástrojem i pro tuto problematiku. Díky výkonné výpočetní technice lze pohodlně zkoumat vliv geomagnetických bouří na zemský povrch v různých situacích i na domácích počítačích a dá se očekávat, že se bude tento postup v budoucnu aplikovat stále častěji.

6.2 Technický přístup

Geofyzikální část má v podstatě jediný, byť složitý, úkol a to určení geoelektrického pole na zemském povrchu. V technické části je však možností více.

Některé postupy se soustředí pouze na určení protékajícího geomagneticky indukovaného proudu jednotlivými vedeními a transformátory. Při znalosti geoelektrického pole z předešlého kroku je tento výpočet relativně snadný.

Z důvodu velmi malých frekvencí GIC lze při výpočtu uvažovat pouze s činnými odpory. Jde tedy jen o systém obvodů s odpory, které představují vedení, transformátory a odpory uzemnění. Navíc se nemusí modelovat transformátory, které nejsou vodivě spojeny se zemí a zanedbávají se i napěťové hladiny pod 230 kV z důvodu jejich větších odporů ve srovnání s napěťovými hladinami vyššími. [3], [25]

Geoelektrické pole představují v těchto obvodech napěťové zdroje. Ty by měli být v případech nehomogenních elektrických polí zapojeny do série s vedením a jejich napětí určeno integrací tohoto pole podél vedení. Avšak někdy se uvažují i homogenní rozložení elektrických polí a jejich napětí je určeno pouze ze vzdálenosti dvou uzlů a intenzitou elektrického pole mezi nimi. [25]

V těchto případech je tak výsledkem pouze tekoucí proud vedením, který slouží například k ověření správnosti výsledků ve srovnání s naměřenými skutečnými proudy, k určení chování transformátorů ze znalosti jejich chování pod jednotlivými velikostmi proudů či k dalším výpočtům.

Dalším, mnohem komplikovanějším, úkolem je modelování vlivu GIC na jednotlivé prvky sítě. K tomuto účelu jsou vhodné simulační programy jako například EMTP-ATP použitý v této práci. S jejich pomocí lze určit, jakým způsobem jednotlivé prvky geomagnetické proudy ovlivňují a jaké následky to může způsobit. [3], [21]

Roli může i v tomto případě opět sehrát i software na výpočet polí. A to například jednak při přesnějším modelování magnetického obvodu transformátorů a zhodnocení jejich zranitelnosti vůči GIC anebo může sloužit k určení jejich oteplení. Obzvláště oteplení nelze běžnými obvodovými simulačními programy určit a pro modelování vlivu GIC na teplotu je tak nutné použít právě software, který dokáže tepelná pole vypočítat. [19]

Při známém chování transformátorů při různých úrovních geomagneticky indukovaného proudu – jedná se hlavně o nárůst odebíraného jalového výkonu, který je na GIC lineárně závislý - je pak jen krok k zakomponování těchto jevů do síťového simulátoru.

A skutečně minimálně dva takovéto simulátory existují. Jedná se o volně šiřitelný program OpenDSS, vyvinutý organizací EPRI, který umožňuje vlivy geomagneticky indukovaných proudů počítat již v základu a komerční program PowerWorld Simulator, ke kterému je pro tyto výpočty k dispozici doplněk. [38], [39]

Oba programy umožňují na základě známého rozložení geoelektrického pole, a to i v případě pole nehomogenního, určit geomagneticky indukované proudy, bilance výkonů či napětí v síti na základě stanovených scénářů. Ze své podstaty však nedokáží modelovat další aspekty vlivu GIC na síť jako tvorbu harmonických vyšších řádů, vliv na kondenzátorové baterie, oteplení apod. K těmto účelům je i nadále nutné použít jiné softwarové vybavení, které bylo popsáno v předešlých odstavcích. [38], [39]

Pro modelování vlivu geomagnetických bouří na povrch Země jsou k dispozici kvalitní řešení a softwarové nástroje, které dokáží vytvořit přesné výsledky, ale jsou limitovány přesnostmi vstupních údajů. Možnosti modelování vlivu těchto bouří na elektrické sítě jsou již dnes také rozsáhlé. Avšak chybí zde jednotný nástroj, který by dokázal zastřešit celou problematiku a dokázal by simulovat i harmonické či ochrany u rozsáhlých celků, což je u problematiky geomagnetických bouří, které ovlivňují velké plochy zemského povrchu, žádoucí.

Je ovšem snaha zpřesňovat data o geomagnetických bouřích a získávat je ve větším předstihu - viz úvod této diplomové práce - a časem snad bude možné, s kvalitní předpovědí a simulačními prostředky, určit následky geomagnetických bouří dřív, než se tyto bouře k Zemi vůbec dostanou.

7. ZÁVĚR

V programu ANSYS Maxwell byl vytvořen trojrozměrný model části povrchu Země a electrojetu. Nejprve byl vytvořen základní model. Na tomto modelu byly názorně ukázány základní vlastnosti, která tato problematika vykazuje, jako je závislost frekvence proudu electrojetu nebo vodivosti povrchu Země na výsledném geoelektrickém poli. Bylo ukázáno, že velikost geoelektrického pole je větší v oblastech s méně vodivým podložím a při rychlejší změně proudu electrojetu. Tento model byl následně zpřesněn použitím realistických rozměrů electrojetu či použitím několika vodivých vrstev reprezentující zemský povrch. Výsledky poté posloužili jako základ při výpočtu napětí mezi dvěma uzly přenosové soustavy integrací intenzity numericky vypočítaného geoelektrického pole podél dráhy zvoleného vedení. Mezi konci 300km dlouhého vedení bylo takto určeno napětí přesahující 2 kV. Toto napětí bylo následně použito při simulaci vlivu geomagnetických proudů na část přenosové soustavy v další části této práce. Model byl ještě jednou modifikován, tentokrát pro výpočet vlivu nehomogenit podloží a zejména vlivu moře či jiných velkých vodních ploch. V tomto případě bylo zjištěno, že intenzita geoelektrického napětí může v pobřežních oblastech výrazně vzrůst a části elektrické přenosové soustavy blízko moří mohou být tímto více namáhány.

Při simulování vlivu geomagnetických poruch na přenosové soustavy byla pozornost věnována hlavně nejzranitelnějším částem soustavy během těchto bouří, transformátorům. Při zkoumání modelu transformátoru, který byl vytvořen v programu EMTP-ATP ze získaných technických údajů, bylo zjištěno, že stačí geomagneticky indukované proudy jen v řádu jednotek ampérů, aby došlo k tzv. půlperiodovému přesycení jádra. Vlivem přesycení při kladných či záporných půlvlnách dochází k impulzním zvětšením magnetizačního proudu a ke zvýšení výskytu vyšších harmonických složek v proudu, a to v tomto konkrétním případě hlavně druhé, čtvrté a páté, a ke zvýšení odběru jalového výkonu, který je na GIC lineárně závislý. Pro simulování vlivu na síť byl vytvořen jednoduchý model s generátorem, dvěma transformátory, vedením a zátěží, na kterém byl simulován vliv napětí vypočteného v programu Maxwell. Během několika vteřin po aplikování tohoto napětí, došlo k půlperiodovému přesycení všech transformátorů, výraznému zvýšení odebíraného jalového výkonu a zvýšení výskytu harmonických složek v proudech a to obzvlášť v proudu z napájecího zdroje. Vlivem toho došlo k náhlému poklesu napětí a kvůli impulznímu charakteru magnetizačních proudů i k ovlivnění tvarů napěťových sinusových průběhů, které byli zkesleny druhou a čtvrtou harmonickou.

V poslední části byly zhodnoceny dostupné aktuální možnosti modelování této problematiky. Bylo uvedeno několik přístupů k této problematice a zmíněno i několik softwarových řešení. Dá se říci, že jsou dnes možnosti modelování a simulace široké, avšak obzvlášť v elektrotechnické části chybí nějaký komplexní nástroj, který by umožnil simulovat širší škálu vlivů způsobených geomagneticky indukovanými proudy a zároveň to dokázal u větší rozlohy sítě.

Ve všech zde řešených případech se jedná více méně jen o ukázkové příklady, protože celá tato práce má spíše úvodní informativní charakter k této problematice, kde upozornila na možné problémy, které mohou geomagnetické bouře způsobit a nastínila možnosti, jaké modelování při řešení těchto rizik poskytuje. Jako taková proto nabízí mnoho dalších možných směrů, jakým na ni mohou navázat práce jiné a to převážně v části věnující se přenosovým soustavám, kde mohou být důkladněji prozkoumány vlivy na regulaci výkonů a napětí či funkci ochran.

8. LITERATURA

1. AMOS, J. UK Met Office opens 'solar storm' centre. In: *BBC* [online]. 8. 10. 2014 [cit. 2014-10-10]. Dostupné z: <http://www.bbc.com/news/science-environment-29525154>
2. BOTELER, D. H. The super storms of August/September 1859 and their effects on the telegraph system. *Advances in Space Research* [online]. Elsevier, 2006, **38** (2), 159-72 [cit. 2014-10-18]. ISSN 0273-1177. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117706000214>
3. *2012 Special Reliability Assessment Interim Report: Effects of Geomagnetic Disturbances on the Bulk ...* [online]. Atlanta: NERC, 2012 [cit. 2014-10-19]. Dostupné z: <http://www.nerc.com/files/2012GMD.pdf>
4. BOTELER, D. H. R. J. PIRJOLA a H. NEVANLINNA. The effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at the Earth's surface. *Advances in Space Research* [online]. Elsevier Science, 1998, **22** (1), 17-27 [cit. 2014-10-19]. ISSN 0273-1177. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S027311779701096X>
5. BOLDUC, L. GIC observations and studies in the Hydro-Québec power system. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* [online]. Elsevier, 2002, **64** (16), 1793-802 [cit. 2014-10-18]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682602001281>
6. PULKKINEN, A. et al. Geomagnetic storm of 29–31 October 2003: Geomagnetically induced currents and their relation to *Space Weather* [online]. American Geophysical Union, 2005, **3** (8) [cit. 2014-10-19]. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2004SW000123/full>
7. BOTHMER, V. a I. A. DAGLIS. *Space Weather: Physics and effects*. Berlin. Springer, 2007. ISBN 3-540-23907-3.
8. PULKKINEN, A. *Geomagnetic Induction During Highly Disturbed Space Weather Conditions: Studies of Ground Effects*. Helsinki: 2003. Academic Dissertation. University of Helsinki, Faculty of Science, Department of Physical Sciences [cit. 2014-11-01]. ISBN 952-10-1253-6. Dostupné z: <http://ethesis.helsinki.fi/julkaisut/mat/fysik/vk/pulkkinen/geomagne.pdf>
9. LILENSTEN, J. a J. BORNAREL. *Space Weather, Environment and Societies*. 1st ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 2006. ISBN 978-1-4020-4331-4.
10. OHTANI, S.I. et al. *Magnetospheric Current Systems*. Washington DC: American Geophysical Union, 2000. ISBN 0-87590-976-0.
11. LE, G. J. A. SLAVIN a R. J. STRANGEWAY. Space Technology 5 observations of the imbalance of regions 1 and 2 field-aligned currents and its *Journal of Geophysical Research: Space Physics* [online]. American Geophysical Union, 2010, **115** (A7) [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: 10.1029/2009JA014979
12. NOAA Space Weather Scales. *NOAA/Space Weather Prediction Center* [online]. verze March 1, 2005 [cit. 2014-11-02]. Dostupné z: <http://www.swpc.noaa.gov/NOAA scales/index.html>
13. The K-index. *NOAA/Space Weather Prediction Center* [online]. verze December 12, 2011 [cit. 2014-11-02]. Dostupné z: <http://www.swpc.noaa.gov/info/Kindex.html>

14. CLIVER, E. W. a L. SVALGAARD. The 1859 Solar–Terrestrial Disturbance And the Current Limits of Extreme Space Weather Activity. *Solar Physics* [online]. Kluwer Academic Publishers, 2004, **224** (1), 407-22 [cit. 2014-10-18]. ISSN 0038-0938. Dostupné z: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11207-005-4980-z>
15. MCKAY, A. J. *Geoelectric Fields and Geomagnetically Induced Currents in the United Kingdom*. Edinburgh: 2003. Thesis. University of Edinburgh, College of Science and Engineering, School of GeoScience [cit. 2014-12-02]. Dostupné z: <https://www.era.lib.ed.ac.uk/handle/1842/639>
16. PIRJOLA, R. Geomagnetically induced currents during magnetic storms. *Plasma Science, IEEE Transactions on* [online]. IEEE, 2000, **28** (6), 1867 - 1873 [cit. 2014-12-02]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=902215>
17. MOUSAVI, S. A. *Electromagnetic Modelling of Power Transformers for Study and Mitigation of Effects of GICs*. Stockholm: 2015. Doctoral Thesis. Royal Insitute of Technology, School of Electrical Engineering, Divison of Electromagnetic Engineering [cit. 2015-03-20]. ISBN 978-91-7595-411-0. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:787251/FULLTEXT02.pdf>
18. MACH, V. EMTP-ATP - Pokročilý. *Osobní stránky Dr. Veleslava Macha* [online]. verze 9. 3 2012 [cit. 2015-03-11]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~mah30/>
19. GIRGIS, R. a K. VEDANTE. Effects of GIC on power transformers and power systems [online]. Orlando: IEEE, 2012, s. 1-8 [cit. 2015-03-12]. ISBN 978-1-4673-1934-8. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6281595>
20. GISH, W. B. W. E. FEERO a G. D. ROCKEFELLER. Rotor Heating Effects from Geomagnetic Induced Currents. *IEEE Transactions on Power Delivery* [online]. IEEE, 1994, **9** (2), 712-19 [cit. 2014-10-26]. ISSN 0885-8977. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=296248>
21. ZHENG, T. et al. Effects of Geomagnetically Induced Currents on current transformer and differential protection. In: *Power and Energy Society General Meeting* [online]. Vancouver: IEEE, 2013, s. 1-5 [cit. 2014-12-02]. ISSN 1944-9925. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6672193>
22. DONG, B. et al. Evaluating the applicability of the finite element method for modelling of geoelectric fields. *Annales Geophysicae* [online]. 2013, **31** (10), 1689-98 [cit. 2014-11-02]. Dostupné z: <http://www.ann-geophys.net/31/1689/2013/angeo-31-1689-2013.html>
23. PIRJOLA, R. J. Modelling the electric and magnetic felds at the Earth's surface due to an auroral electrojet. *Journal of Atmospheric and Solar!Terrestrial Physics* [online]. 1998, **60** (11), 1139-48 [cit. 2014-11-05]. ISSN 1364-6826. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682698000704>
24. PIRJOLA, R. a A. VILJANEN. Complex image method for calculating electric and magnetic fields produced by an auroral electrojet *Annales Geophysicae* [online]. 1998, **16** (11), 1434-44 [cit. 2014-10-08]. Dostupné z: <http://www.ann-geophys.net/16/1434/1998/angeo-16-1434-1998.html>
25. BOTELER, D. H. a R. J. PIRJOLA. Modelling geomagnetically induced currents produced by realistic and uniform electric fields. *Power Delivery, IEEE Transactions on* [online]. IEEE ,

- 1998, **13** (4), 1303-08 [cit. 2014-12-01]. ISSN 0885-8977. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=714500>
26. HERMANC, J. F. Electromagnetic induction in the Earth by moving ionospheric current systems. *Geophysical Journal International* [online]. 1978, **55** (3), 557-76 [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: <http://gji.oxfordjournals.org/content/55/3/557.short>
 27. VILJANEN, A. O. AMM a R. PIRJOLA. Modeling geomagnetically induced currents during different ionospheric situations. *Journal of geophysical research* [online]. Helsinki: Finish Meteorological Institute, 1999, **104** (A12), 28,059-71 [cit. 2014-11-05]. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/1999JA900337/abstract>
 28. ÁDÁM, A. et al. *Geoelectric Lithosphere Model of the Continental Europe* [online]. MTA Research Centre for Astronomy and Earth Sciences, 2012 [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: http://real.mtak.hu/2957/1/EURHOM_1.0_dat.pdf
 29. BOTELER, D. H. R. PIRJOLA a L. TRICHTCHENKO. On calculating the electric and magnetic fields produced in technological systems at the Earth's *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* [online]. Pergamon, 2000, **62** (14), 1311-15 [cit. 2015-02-20]. ISSN 1364-6826. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682600000717>
 30. *High-Impact, Low-Frequency Event Risk to the North American Bulk Power System* [online]. NERC, 2010 [cit. 2014-10-19]. Dostupné z: <http://energy.gov/sites/prod/files/High-Impact%20Low-Frequency%20Event%20Risk%20to%20the%20North%20American%20Bulk%20Power%20System%20-%202010.pdf>
 31. HEINSON, G. S. CONSTABLE a A. WHITE. The electrical conductivity of the lithosphere and asthenosphere beneath the coastline of southern *Exploration Geophysics* [online]. 1993, č. 24, s. 195-200 [cit. 2015-02-12]. Dostupné z: http://marineemlab.ucsd.edu/steve/bio/SoCal_bullASEG.pdf
 32. ANG, S. P. *Ferroresonance Simulation Studies of Transmission Systems*. Manchester: 2010. Thesis. The University of Manchester, Faculty of Engineering and Physical Sciences, School of Electrical and Electronic Engineering [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: <https://www.escholar.manchester.ac.uk/uk-ac-man-scw:96181>
 33. PENG, J. *Assessment of Transformer Energisation Transients and Their Impacts on Power Systems*. Manchester: 2013. Thesis. The University of Manchester, Faculty of Engineering and Physical Sciences, School of Electrical and Electronic Engineering [cit. 2015-01-21]. Dostupné z: <https://www.escholar.manchester.ac.uk/uk-ac-man-scw:191532>
 34. EMTP USER GROUP. *ATPDraw version 5.6* [manuál k softwaru EMTP-ATP]. 2009.
 35. OTAVA, T. *Posouzení ekonomické efektivnosti modernizace vedení VVN*. Praha: 2014. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd [cit. 2015-02-15]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/23734>
 36. KREJČÍ, P. *Cvičení z elektroenergetiky*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2003.
 37. ZHENG, K. et al. Effects of Geophysical Parameters on GIC Illustrated by Benchmark

- Network Modeling. *IEEE Transactions on Power Delivery* [online]. IEEE, 2013, **28** (2), 1183 - 1191 [cit. 2015-02-23]. ISSN 0885-8977. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6480904>
38. DUGAN, R. C. *OpenDSS Manual* [online]. EPRI, 2013 [cit. 2015-03-08]. Dostupné z: <http://sourceforge.net/p/electricdss/code/HEAD/tree/trunk/Distrib/Doc/OpenDSSManual.pdf>
39. *Web PowerWorld Corporation* [online]. 1997-2015 [cit. 2015-03-08]. Dostupné z: <http://www.powerworld.com/>

9. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha na CD

- 1000MVA.acp – Měření transformátoru 1000 MV·A z obr. 5.1
- Ilustracni_tr.acp – Model ilustračního transformátoru z obr. 3.4
- Nehomogeneity.mxwl – Model pobřeží z kapitoly 4.3
- Presnejsi.mxwl – Přesnější model z kapitoly 4.2
- Soustava.acp – Model části soustavy z kapitoly 5.3
- Zakladni_1.mxwl – Model z kapitoly 4.1 s vodivostí $0,001 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$
- Zakladni_2.mxwl - Model z kapitoly 4.1 s vodivostí $0,1 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$